

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KUMLU ZEMİNLERİN KAYMA DİRENCİNE BAZALT FİBERİN
KATKISI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Melike ÖZTOPRAK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

OCAK 2023

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KUMLU ZEMİNLERİN KAYMA DİRENCİNE BAZALT FİBERİN
KATKISI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Melike ÖZTOPRAK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ertan BOL

OCAK 2023

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “KUMLU ZEMİNLERİN KAYMA DİRENCİNE BAZALT FİBERİN KATKISI” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(24/01/2023)

Melike ÖZTOPRAK

Canım aileme ithafen

TEŞEKKÜR

Lisans ve Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Ertan BOL'a teşekkürlerimi sunarım.

Lisans eğitimim boyunca ve tez süresince kendisinden ders aldığım, bilgi, birikim ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda fikirlerini ve desteğini esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Öğretim Üyeleri Doç. Dr. Sedat SERT ve Doç. Dr. Aşkın ÖZOCAK'a teşekkür ederim. Laboratuvarda gerçekleştirdiğim deneyler boyunca bana her türlü desteği veren tekniker Recep EYÜPLER ve tekniker Sebahattin İÇ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatımın her aşamasında yanımda olan, maddi ve manevi desteğini bir an olsun üzerimden eksik etmeyen canım aileme ve kıymetli eşime, yüksek lisans tezimi bitirmemdeki katkılarından dolayı biricik arkadaşım Selen TERZİ'ye şükranlarımı sunarım.

Melike ÖZTOPRAK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|---|--------------|
| ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ | v |
| TEŞEKKÜR | ix |
| İÇİNDEKİLER | xi |
| KISALTMALAR | xiii |
| SİMGELER | xv |
| TABLO LİSTESİ | xvii |
| ŞEKİL LİSTESİ | xix |
| ÖZET | xxi |
| SUMMARY | xxiii |
| 1. GİRİŞ VE AMAÇ | 1 |
| 2. KATKI MALZEMELERİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRME VE FİBER KATKISI | 3 |
| 2.1. Zemin İyileştirme | 3 |
| 2.2. Zemin İyileştirme Yöntemleri | 3 |
| 2.3. Katkı Malzemesi ile Zemin İyileştirme Çalışmaları | 6 |
| 2.3.1. Kireç katkısı | 6 |
| 2.3.2. Çimento katkısı | 8 |
| 2.3.3. Bitüm (asfalt) katkısı | 10 |
| 2.3.4. Çelikhane cürufu katkısı | 12 |
| 2.3.5. Atık lastik katkısı | 14 |
| 2.3.6. Atık gazbeton katkısı | 17 |
| 2.3.7. Mermer tozu ve uçucu kül katkısı | 18 |
| 2.4. Fiber Katkısı ile Zemin İyileştirme | 21 |
| 2.4.1. Doğal fiber katkısı | 22 |
| 2.4.1.1. Keten fiber katkısı | 23 |
| 2.4.1.2. Hindistan cevizi fiberi katkısı | 24 |
| 2.4.2. Yapay fiber katkısı | 26 |
| 2.4.2.1. Polipropilen (PP) fiber katkısı | 26 |
| 2.4.2.2. Polyester (PET) fiber katkısı | 26 |
| 3. BAZALT VE BAZALT FİBERLER | 28 |
| 3.1. Bazalt | 28 |
| 3.2. Bazalt Fiber | 28 |
| 3.2.1. Bazalt fiber (elyaf veya lif) üretimi ve özellikleri | 29 |
| 3.3. Betonda Bazalt Fiber Katkısı | 31 |
| 3.4. Zemin İyileştirmede Bazalt Fiber Katkısı | 33 |
| 4. MALZEMELER VE YÖNTEM | 37 |
| 4.1. Malzemeler | 37 |
| 4.1.1. Kum zemin | 37 |
| 4.1.2. Bazalt fiber | 38 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2. Yöntem | 39 |
| 4.2.1. Fiziksel deneyler | 41 |
| 4.2.1.1. Elek analizi | 41 |
| 4.2.1.2. Piknometre deneyi | 42 |
| 4.2.1.3. Rölatif sıklık deneyi | 43 |
| 4.3. Kesme Kutusu Deneyleri | 44 |
| 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA | 49 |
| 5.1. Kesme Kutusu Deneyinden Elde Edilen Sonuçlar | 49 |
| 5.2. Kesme Gerilmesi ve Yatay Deformasyon Arasındaki İlişki | 56 |
| 6. SONUÇ VE ÖNERİLER | 61 |
| KAYNAKLAR | 63 |
| ÖZGEÇMİŞ | 69 |

KISALTMALAR

| | |
|-------------|---|
| BOS | : Çelikhane cürufu (Basic oxygen furnace slag) |
| CBR | : Kaliforniya taşıma oranı (California bearing ratio) |
| EAO | : Elektrikli ark ocak |
| İO | : İndüksiyon ocak |
| PE | : Polietilen |
| PET | : Polyester |
| pH | : Potansiyel hidrojen |
| PP | : Polipropilen |
| SEM | : Taramalı elektron mikroskobu (Scan electron microscope) |
| UU | : Konsolidasyonsuz drenajsız (Unconsolidated undrained) |
| XRD | : X-ışını kırınım (X-ray diffraction) |
| YASS | : Yer altı su seviyesi |

SİMGELER

| | |
|------------------------------------|--|
| CL | : Düşük plastisiteli kil |
| CaCO₃ | : Kalsiyum karbonat |
| E | : Elastisite modülü |
| σ_c | : Çekme gerilmesi |
| σ | : Normal gerilme τ |
| SiO₂ | : Silisyum Dioksit |
| Al₂O₃ | : Alüminyum Oksit |
| e | : İstenilen rölatif sıklıktaki boşlukoranı |
| e_{maks} | : Maksimum boşluk oranı |
| e_{min} | : Minimum boşluk oranı |
| D₁₀ | : Efektif dane çapı |
| c | : Kohezyon |
| c_u | : Üniformluk katsayısı |
| c_r | : Süreklilik katsayısı |
| τ | : Kayma (Kesme) Gerilmesi |
| τ_{maks} | : Maksimum kayma gerilmesi |
| δ | : Yatay deformasyon |
| Ca(OH)₂ | : Kireç |
| CaO | : Kalsiyum oksit (Sönmemiş kireç) |
| Ca(OH)₂.MgO | : Yüksek kalsiyumlu kireç |
| CH | : Yüksek plastisiteli kil |
| SP | : Üniform kum |
| D_r | : Rölatif sıklık |
| ϕ | : Kayma direnci açısı |

TABLO LİSTESİ

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| Tablo 2.1. Fiber çeşitleri..... | 22 |
| Tablo 2.2. Değişik fiber çeşitlerine ait tipik özellikler | 22 |
| Tablo 3.1. Bazalt fiberlerin diğer fiberlerle karşılaştırılması | 31 |
| Tablo 4.1. Deneylede kullanılan kum zeminine ait parametreler. | 38 |
| Tablo 4.2. Bazalt fiberin fiziksel ve mekanik özellikleri | 39 |
| Tablo 4.3. Hazırlanan karışımlarda kum ve fiber ağırlığı, fiber boyu ve oranları. ... | 40 |
| Tablo 5.1. Kayma direnci parametrelerine ait değerler. | 54 |
| Tablo 5.2. Kesme kutusu deneylerinden elde edilen maksimum kayma gerilmesi değerleri..... | 56 |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1. Zemin cinsine bağlı olarak zemin iyileştirme yöntemleri | 4 |
| Şekil 2.2. Zeminin dane boyutlarına bağlı olarak zemin iyileştirme yöntemleri..... | 5 |
| Şekil 2.3. 2014 Yılı Çelikhane Cürufu ile Atık ve Geri Kazanım Miktarları..... | 12 |
| Şekil 2.4. SEM görüntüleri (a) %90 kil + %10 mermer tozu(kürsüz), (b) %90 kil + %10 mermer tozu (7 günlük kür), (c) %80 kil + %20 mermer atığı (7 günlük kür) | 19 |
| Şekil 3.1. Bazalt ve bazaltın öğütülmüş hali..... | 28 |
| Şekil 3.2. Bazalt fiberin farklı formları (a) kırılmış bazalt fiber, (b) bazalt ip, (c) bazalt çubuklar..... | 29 |
| Şekil 3.3. Bazalt fiberin temsili üretim aşamaları..... | 30 |
| Şekil 4.1. Kum zemin numunesi. | 38 |
| Şekil 4.2. Farklı boylarda bazalt fiberler (a) birbirinden ayrılmış bazalt fiberler (b) , bazalt fiberlerin mikroskopik görünüşleri (c,d)..... | 39 |
| Şekil 4.3. Doğal durumdaki kum numunesi ve bazalt fiber karıştırılmış kum numunesi. | 40 |
| Şekil 4.4. Kum zemin numunesine ait dane dağılım eğrisi ve efektif çaplar. | 41 |
| Şekil 4.5. Elek analizine ait fotoğraflar. | 42 |
| Şekil 4.6. Piknometre deneyine ait fotoğraflar. | 43 |
| Şekil 4.7. Rölatif sıklık deneyine ait fotoğraflar..... | 44 |
| Şekil 4.8. Deneylerde kullanılan kesme kutusu cihazı. | 45 |
| Şekil 4.9. Kesme kutusu deneyine tabi tutulmuş numunelerin tümü..... | 46 |
| Şekil 5.1. Doğal kum numunesi..... | 49 |
| Şekil 5.2. %1 fiber oranı (a) 6 mm, (b) 12 mm, (c) 24 mm. | 50 |
| Şekil 5.3. %1.5 fiber oranı (a) 6 mm, (b) 12 mm, (c) 24 mm..... | 51 |
| Şekil 5.4. %2 fiber oranı (a) 6 mm, (b) 12 mm, (c) 24 mm. | 52 |
| Şekil 5.5. %2,5 fiber oranı (a) 6 mm, (b) 12 mm, (c) 24 mm. | 53 |
| Şekil 5.6. c ve ϕ değerlerinin grafiksel gösterimi. | 55 |
| Şekil 5.7. %1 fiber oranında ve farklı normal gerilmeler altında kesme gerilmesi ve yatay deformasyona ait grafikler, (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 150 kPa. .. | 58 |
| Şekil 5.8. %1.5 fiber oranında ve farklı normal gerilmeler altında kesme gerilmesi ve yatay deformasyona ait grafikler, (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 150 kPa. .. | 58 |
| Şekil 5.9. %2 fiber oranında ve farklı normal gerilmeler altında kesme gerilmesi ve yatay deformasyona ait grafikler, (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 150 kPa. .. | 59 |
| Şekil 5.10. %2.5 fiber oranında ve farklı normal gerilmeler altında kesme gerilmesi ve yatay deformasyona ait grafikler, (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 150 kPa. .. | 59 |

KUMLU ZEMİNLERİN KAYMA DİRENCİNE BAZALT FİBERİN KATKISI

ÖZET

Nüfus yoğunluğunun beraberinde kentleşmenin giderek artması büyük projelere (yüksek katlı binalar, yeraltı ve yerüstü ulaşım yolları, barajlar v.b) olan ihtiyacı meydana getirmiştir. İnşa edilecek yapı yüklerinin artması, elverişli zemin arazilerinin yetersizliği, zayıf zeminin terkedilememesi ve projenin zemin koşullarına uygun hale getirilememesi gibi durumlar elverişsiz zeminlerde yapılaşmayı zorunlu hale getirmiştir. Bu olumsuz koşullar zemin iyileştirme yöntemlerini çözüm olarak ortaya çıkarmaktadır. Zemin iyileştirme, zeminin geoteknik özelliklerinin farklı fiziksel, kimyasal veya biyolojik yöntemler kullanılarak iyileştirilmesi olarak tanımlanabilir. İyileştirmenin amacı zeminin taşıma gücünü ve kayma direnci parametrelerini arttırmak, oturmaları, sıvılaşma potansiyelini ve boşluk oranını azaltmaktır. Son yıllarda geoteknik mühendisliği uygulamalarında zemine katkı maddeleri katılarak iyileştirme yöntemi oldukça yaygındır. Bu katkı maddelerine doğal lif olarak sınıflandırılan yüksek mukavemetli bazalt fiberler örnek olarak verilebilir. Bazalt fiberler ucuz hammadde ve düşük üretim maliyetine sahip olmasının yanı sıra çevre dostu olması sebebiyle zemin iyileştirme çalışmalarındaki değeri literatürde her geçen gün artmaktadır.

Bu çalışmada, bazalt fiberin kumlu zeminlerin kayma direnci parametreleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deneylerde kullanılan kum Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarı'ndan alınmıştır. Doğal kum zeminine ağırlıkça %0, %1, %1.5, %2, %2.5 oranında ve boy olarak 6 mm, 12 mm, 24 mm uzunluğundaki bazalt fiberler katılarak numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler sabit bir rölatif sıklık değerinde olacak şekilde kare kesitli kesme kutusuna hassasiyetle yerleştirilmiştir. Deneyler 50, 100 ve 150 kPa normal gerilmeler altında yükleme hızı 0.5 mm/dk olacak şekilde kesme kuvvetine maruz bırakılarak gerçekleştirilmiştir. Bazalt fiber katkılı ve katkısız kum numuneleri üzerinde toplamda 39 adet kesme kutusu deneyi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre, artan fiber oranı ve boyu ile kohezyon arasında sistematik bir ilişki saptanamamıştır. Bununla birlikte kohezyon maksimum değerine %2 oranında 12 mm boyunda bazalt fiber katılmasıyla elde edilen numunede ulaşılmıştır. Kum zemine %1.5 oranında bazalt fiber katılmasıyla tüm boylarda kayma direnci açıları en yüksek değerine sahipken bu orandan sonra radikal bir biçimde düşüşe geçmiştir ve maksimum değerine %1.5 oranında 24 mm boyunda bazalt fiber katılmasıyla elde edilen numunede ulaşılmıştır. Sonuçlardan anlaşılacağı üzere kum zeminlere bazalt fiber eklenmesi kayma direncini arttırıcı bir etki göstermiştir ve katkı malzemeleriyle zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılan malzemelere alternatif olabileceği sonucuna varılmıştır.

CONTRIBUTION OF BASALT FIBER TO SHEAR STRENGTH OF SAND SOILS

SUMMARY

The gradual increase in urbanization along with the overpopulation has created the need for large projects (high-rise buildings, infrastructure and surface transportation roads, dams, etc.). Situations such as the increase in structural loads, the inadequacy of suitable soil sites, the inability to abandon the weak soil and adapt the project to soil conditions have made it necessary to build the structures on weak soils. These adverse conditions reveal soil improvement methods as a solution. Improvement methods can range from lowering the pore water level of the soil to increasing the shear resistance of the soil with chemical or biological additive agents. Therefore, it is not possible to classify these methods under a single title. As a matter of fact, many researchers have categorized the improvement methods differently. When choosing the method to be applied, the type of soil (clay, silt, organic matter content, etc.), the geological condition of the site and the groundwater level must be taken into consideration. However, while determining the method to be applied in the principle of geotechnical engineering, it is also very important that it is safe, fast in terms of supply, economical and functional. Soil improvement can be defined as the improvement of the geotechnical properties of the soil by using different physical, chemical or biological methods. In other words, it means to increase strength and stiffness of the soil. The aim of the improvement is to increase the bearing capacity and shear resistance parameters of the soil, to reduce settlements, liquefaction potential and void ratio. If the soil properties are not sufficient in terms of bearing capacity and settlement, the simplest and easiest solution is to design the foundation system according to the soil conditions. In these systems, the first thing that comes to mind is to create a logical study with shallow foundation applications by taking the uniform load distribution of the soil structure as a criterion. If the structural loads cannot be transmitted safely to the soil through the shallow foundation system, deep foundations can be fabricated. However, due to the increase in the height of the buildings constructed nowadays, there is an increase in the structural loads to be transmitted to the soil. Therefore, advanced technology applications are required for the new structures to be built compared to the old ones. As a result, construction costs increase extremely. This reveals the disadvantages of deep foundation applications. Different methods are being developed and researched to reduce costs and provide ease of application. For example, to improve the physical and mechanical properties of the soils, soil improvement studies are constantly increasing by adding natural and artificial additives to the soil. For many years, lime, cement and bitumen has been used as additives. However, in recent years, different alternatives have been created with the addition of natural or artificial fibers to the soils.

In recent years, the soil improvement method by utilizing additives to the soil is quite common in geotechnical engineering applications. High-strength basalt fibers that are

classified as natural fibers, can be given as examples of these additives. Basalt fibers are obtained by melting and drawing basalt, a type of volcanic rock, at high temperatures. In brief the production process; it can be listed as preparing melt from basalt, shrinking the melt, fiber formation, coating the fiber surface with resin and wrapping it into tubes with a winding device. The production technique of basalt fibers is similar to the production technique of glass fibers, except for the differences in temperature and viscosity parameters. Since basalt rock is widely found in the earth's crust, the raw material of basalt fiber is cheap and the production cost is low. The dense and hard structure of basalt provides the its fiber to have superior mechanical properties and a durable structure. It also shows strong resistance against heat, impact load and chemical factors. In addition to these properties, basalt fibers can be used in many areas in civil engineering as they are environmentally friendly and they show high tensile strength. Especially its value in soil improvement studies is increasing day by day in the literature.

In this study, the effect of basalt fiber on the shear strength parameters of sandy soils was investigated. Within the scope of the thesis, soil improvement methods with additives were explained and supported by literature examples. In addition, the properties of the materials used in the thesis, the testing apparatus and methods were introduced, and the test results were presented in tables and graphics. The effect of basalt fiber additive on sandy soil, depending on the fiber length and ratio parameters, was determined by direct shear testing apparatus. Direct shear tests are one of the oldest and fastest methods used to determine the shear resistance parameters of soils. In the principle of the experiment, a soil sample is placed in a box with square or circular cross-section and consisting of two parts. The upper part of these boxes is kept fixed and the lower part is moved at a constant speed and by applying a certain horizontal force. Meanwhile, a certain normal force is applied to the sample in the box and it is forced to fail along a predetermined horizontal plane.

All experiments within the scope of the study were carried out in Sakarya University Civil Engineering Geotechnical Laboratory. By evaluating the data obtained from the experiments, it is aimed to facilitate the applications for improving the soils by using additives. The sand used in the experiments was taken from Sakarya University Civil Engineering Geotechnical Laboratory. First of all, physical experiments were applied to determine the geotechnical properties of the natural sandy soil. TS 1500/2000 standard was used and a sieve analysis test was carried out to determine the class of the soil. A pycnometer test was carried out to determine the specific gravity of the soil. Finally, the relative density test was carried out in order to determine the natural, maximum and minimum void ratio. Thereafter, samples were prepared by adding 0%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5% of 6 mm, 12 mm, 24 mm long basalt fibers to the natural sandy soil. The prepared samples were sensitively placed in a square direct shear box with a constant relative density value. The experiments were carried out under normal stresses of 50, 100 and 150 kPa, by subjecting them to a shear force at a loading speed of 0.5 mm/min. A total of 39 shear box tests were carried out on the samples with and without basalt fiber. According to the test results obtained, the shear resistance angle (ϕ) and the cohesion value (c) of the natural sand was found to be 34° and 23.1 kPa, respectively. No systematic relationship was found between increased fiber content and cohesion. However, with the addition of basalt fiber at the rate of 1.5% to the samples, the cohesion values in all lengths had the lowest value, but after this rate, it

increased and reached its maximum value in the sample obtained by adding 2% of basalt fiber in the length of 12 mm.

With the addition of 1.5% basalt fiber to the samples, the shear resistance angles had the highest value in all lengths, but after this ratio, it decreased radically and reached its maximum value in the sample obtained by adding 1.5% basalt fiber with a length of 24 mm. The results have shown that, the addition of 1.5% basalt fiber to sandy soils played a role in increasing the shear strength. Above this ratio, the fibers tend to agglomerate among themselves and cannot be distributed homogeneously in the soil. When the tables and graphs of the maximum shear stress values obtained from the direct shear tests carried out on basalt fiber reinforced sand samples are examined together; higher shear stresses were observed mostly in 24 mm long fibers. This positive effect is followed by fibers of 12 mm length, while fibers of 6 mm length have much less effect on shear stress. This is associated with an increase in the contact area between the fiber and the soil as the fiber length increases. Thus, it is thought the fibers that enter between the soil particles and show better resistance to lateral stresses and prevent the particles from slipping easily over each other.

As the basalt fiber ratio and length increased during the experimental processes, homogeneous mixing and maintaining the homogeneity during the fiber mixtures were transferred to the box became difficult. In order to avoid agglomeration, the fibers can be studied in their original form not separated by air pressure and in larger scale direct shear tests. Direct shear tests were carried out under three different stresses 50, 100 and 150 kPa and outliers were detected in the results of some 150 kPa normal stresses. Therefore, it is recommended to repeat similar studies under lower and more number (at least 4) normal stresses.

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Günümüzün yaşam, enerji ve tüketim talepleri sürekli olarak artmaktadır. Hızlı nüfus artışı olan şehirlerde yeni yerleşim alanları, organize sanayi alanları ve küçük sanayi yapılarının kurulması için geniş alanlar bulmak giderek zorlaşmaktadır. Bu nedenle, iyi zeminli alanların mevcudiyeti azaldıkça, uygun olmayan zayıf zeminli alanlarda yapı yapılması zorunlu hale gelmekte, istenmeyen alanlar dahi kullanıma açılabilmektedir. Kullanıma uygun olmayan arazi üzerindeki inşaat faaliyetleri; yük kapasitesi, kot farkları ve ötelemeler, arazi kotuna ve zemin parametrelerine göre sınılaşma vb. birçok teknik soruna neden olmuştur. Yeni problemler ortaya çıktıkça, o problemler için yeni yöntem ve teknikler geliştirilmiş ve dünyanın farklı yerlerinde uygulanmıştır. Ülkemizde yaygın olarak kullanılan bu yöntemler her geçen gün daha fazla uygulama alanına sahip olmaktadır (Çınar, 2014).

Yapı arazisi taşıma gücü ve oturma açısından yeterli değilse en basit ve kolay çözüm temel sisteminin temel zayıflığına göre projelendirilmesidir. Zayıf zeminlere dayalı temel sistemlerinde, zemin yapısının üniform yük dağılımı kriter alınarak ilk akla gelen yüzeysel temel uygulamalarıyla mantıksal bir çalışma oluşturmaktır. Yapısal yükler yüzeysel temel sistemi aracılığıyla zemine güvenli bir şekilde iletilemiyorsa derin temeller imal edilebilmektedir. Lakin günümüzde inşa edilen binaların yüksekliklerinin artmasına bağlı olarak zemine iletilecek yapı yüklerinde de bir artış meydana gelmektedir. Dolayısıyla eskiye nazaran yeni inşa edilecek yapılar için ileri teknoloji uygulamaları gerekmektedir. Buna bağlı olarak uygulama maliyetleri aşırı derecede yükselmektedir. Bu da derin temel uygulamalarının dezavantajlarını ortaya çıkarmaktadır. Maliyetlerin azaltılması ve uygulama kolaylığı sağlayabilmek amacıyla son dönemlerde farklı yöntemler geliştirilmekte ve araştırılmaktadır. Örneğin, zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için zemine doğal ve yapay katkı malzemeleri katılarak zemin iyileştirme çalışmaları sürekli artmaktadır.

Uzun yıllardır kireç, çimento ve bitüm gibi katkı malzemeleriyle iyileştirilen zeminlere son dönemlerde doğal veya yapay fiberlerin katılmasıyla farklı alternatifler oluşturulmuştur.

Fiber (lif veya elyaf) malzeme, yüksek çekme mukavemeti sayesinde, katkı olarak kullanıldığında zeminlerin kırılma davranışını önlemede etkin rol oynayabilmektedir (Jamsawang ve Sukontasukkul, 2012). Bu sayede fiber takviyeli zeminler, katkı maddesi içermeyen zeminlere göre daha yüksek kayma dirençlerine ulaşabilmektedirler. Zemin iyileştirme çalışmalarına konu olan fiberler yapay ve doğal olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Cam, polyester (PET), polietilen (PE) ve naylon fiberler yapay fiber türlerine örnek gösterilirken keten, bambu ve hindistan cevizi lifleride doğal fiberlere örnek olarak gösterilebilir. Zemini iyileştirmek için kullanılacak bir doğal fiber örneği de bazalt fiberlerdir. Bazalt fiberler, volkanik bir kaya çeşidi olan bazaltın yüksek sıcaklıklarda eritilmesi ve çekilmesiyle elde edilmektedir. Bazalt kayaç yerkabuğunda yaygın olarak bulunması nedeniyle bazalt fiberin hammaddesi ucuz ve üretim maliyeti düşüktür. Ayrıca sığağa, darbe yüküne ve kimyasal etkenlere karşı güçlü bir direnç gösterir. Bu özelliklerinin yanı sıra bazalt fiberler, çevre dostu olması ve yüksek çekme mukavemeti göstermesi amacıyla inşaat mühendisliğinde birçok alanda kullanılabilir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, bazalt fiber katkısının kumlu zeminlerin kayma direnci parametreleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Tüm deneyler Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarı'nda yürütülmüştür. Deneylerden elde edilen verilerin değerlendirilmesiyle, zeminlerin katkı maddeleri kullanılarak iyileştirilmesine yönelik uygulamaların kolaylaştırılması amaçlanmaktadır.

Çalışmada Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarı'ndan elde edilen kum numunesi üzerinde öncelikle fiziksel deneyler yapılarak zeminin geoteknik özellikleri bulunmuştur. Daha sonra deney numuneleri 6 mm, 12 mm ve 24 mm boylarındaki bazalt fiberin, %0, %1, %1.5, %2 ve %2.5 oranlarında kum zemine karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. Son olarak rölatif sıklığı sabit olan katkılı ve katkısız kum numuneler üzerinde farklı normal gerilmeler altında kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir.

2. KATKI MALZEMELERİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRME VE FİBER KATKISI

2.1. Zemin İyileştirme

Artan nüfusun etkisiyle hızlı kentleşme, kompleks yapılara (hidrolik yapılar, yeraltı ve yerüstü ulaşım yolları, yüksek katlı binalar) olan ihtiyacı meydana getirmiştir. Artan yapı yükleri, elverişli zemin arazilerinin yetersizliği, inşa edilecek yapı zemininin terkedilememesi ve tasarımın zemin koşullarına uygun hale getirilememesi gibi durumlar elverişsiz zeminlerde yapılaşmayı mecbur kılmıştır. Bu durumda zemin iyileştirme yöntemlerini çözüm olarak gündeme getirmiştir. Zemin iyileştirme genel tabiri ile zeminin dayanımının ve sertliğinin artırılmasıdır. Zemin iyileştirmede temel amaç zeminin boşluk oranının, geçirgenliğinin, sıvılaşma potansiyelinin ve oturmaların azaltılması, taşıma gücünün artırılması ve konsolidasyonunun hızlandırılmasıdır (Akyıldız, 2020).

2.2. Zemin İyileştirme Yöntemleri

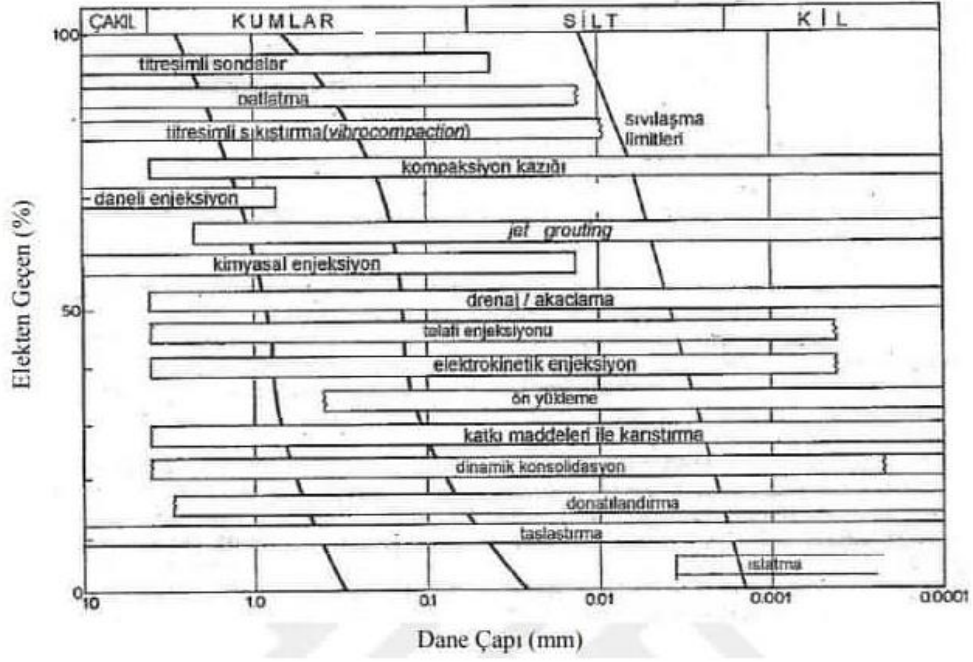
İnşa edilecek yapı zemini daima beklenen özellikleri karşılamayabilir. Bu nedenle günümüzde elverişsiz zeminlerde sık sık iyileştirme yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Genel olarak iri daneli zeminlerde; sıvılaşma, ince daneli zeminlerde; oturma, zayıf taşıma gücü, kalın alüvyon ve dolgu zeminlerde; çökme, oturma ve heyelan gibi problemlerle karşılaşılabilir (Öztoprak, 2016).

Uygulanacak yöntemi seçerken zeminin cinsi (kil, silt, organik madde içeriği vs.), arazinin jeolojik durumu ve YASS (yeraltı su seviyesi) mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Bununla beraber Geoteknik mühendisliği prensibinde uygulanacak yöntem belirlenirken güvenli, tedarik bakımından hızlı, ekonomik ve fonksiyonel olması da çok önemlidir. Holtz ve ark. (2001) tarafından, Şekil 2.1’de görüldüğü gibi uygulanacak yöntemi belirlemede zemin cinsinin etkin olduğu ortaya koyulmuştur.

| İyileştirme yöntemi ve tekniği | İyileştirme yöntemi sınıfı | Uygulanabilecek zemin türleri | Yaygın uygulama alanları | Çeşitlilik ve açıklamalar |
|--|--|---|---|--|
| Gerilme azaltma | Gerilme azaltma | Tüm zemin türleri | Dolgu, şevler | Hafif dolgu materyalleri |
| Zemini kaldırma ve yeniden yerleştirme | Zemini kaldırma ve yeniden yerleştirme | Kohezyonlu yumuşak zeminler, turba | Dolgular, küçük (basit) yapılar | Kontrollü kazı veya patlatma ile tüm derinlik veya kısmi olarak yer değiştirme |
| Kurutma | Konsolidasyon | Killer, siltler muhtemelen turba | Yapı temelleri ve kazılar | Aktif su çekme (pompalama) |
| Ön yükleme, aşırı yükleme | Konsolidasyon | Killer, siltler muhtemelen turba | Dolgular, yapı temelleri | Düşey drenli veya drensiz vakumlu ön yükleme |
| Düşey drenler | Konsolidasyon | Killer, siltler | Dolgular, yapı temelleri | Kum drenleri, Prefabrik geo-kompozit drenler |
| Katkı ile stabilizasyon | Kimyasal | Siltler, killer (özellikle şişen) | Yol alt temeli, havaalanı kaplamaları ve erozyon kontrolü | Kireç, portland çimentosu, uçucu kül ve diğer kimyasal katkıları ile yüzeyel (sığ) iyileştirme |
| Kireç ve kireç çimento kolonları | Kimyasal | Siltler, killer | Dolgular, yapı temelleri, Kazılar | |
| Derin (zemin) karıştırma | Kimyasal | Tüm zemin türleri | Derin kazı, sızıntı ve çevresel etki kesicileri (<i>cut-off</i>) | Çimento ve çimento-bentonit karışımı |
| İçitim ve sızdırma enjeksiyonu | Kimyasal | Fissürlü kaya, tüm daneli zeminler, iri siltler dâhil | Yapı temelleri, sızıntı kesiciler (<i>cut-off</i>), Sıvılaşmayı azaltma, çevresel iyileştirme | Portland ve mikro-ince daneli çimentolar, kimyasallar (Bitüm, silikat, akrilat ... vb.) |

Şekil 2.1. Zemin cinsine bağlı olarak zemin iyileştirme yöntemleri (Holtz ve ark, 2001).

Şekil 2.2’de ise zemin iyileştirme yönteminin seçimi zeminin dane boyutlarıyla ilişkilendirilmiştir (Mitchell, 1981).



Şekil 2.2. Zeminin dane boyutlarına bağlı olarak zemin iyileştirme yöntemleri (Mitchell, 1981).

İyileştirme yöntemleri zeminin boşluk suyu seviyesinin düşürülmesinden, kimyasal veya biyolojik katkı malzemeleriyle zeminin kayma direncinin artırılmasına varana kadar çeşitlilik gösterebilir. Bu nedenle iyileştirme yöntemlerini tek başlık altında sınıflandırmak mümkün değildir. Nitekim birçok araştırmacı iyileştirme yöntemlerini farklı şekilde kategorize etmiştir. Hausmann (1990), zemin iyileştirme yöntemlerini beş ana başlık altında değerlendirmiştir.

1. Mekanik
2. Hidrolik
3. Fiziksel- kimyasal
4. Katkılı- yapısal destekli
5. Kitleyi kısıtlayarak özellikleri iyileştiren

Mekanik iyileştirme, zeminin boşluk hacmini azaltmak amacıyla ani ağır yük veya mekanik dış kuvvet uygulayarak zeminin sıkıştırılması ve yoğunluğunun artırılması işlemi olarak tanımlanabilir. Darbeli veya titreşimli silindirler ile sıkıştırma, dinamik kompaksiyon ve taş kolon (vibro yerleştirme) gibi uygulamalar mekanik iyileştirme tekniklerine örnek gösterilebilir (Sarsılmaz, 2017).

Hidrolik iyileştirme, zeminin boşluk suyu basıncının yatayda ve düşeyde düşürülmesini amaçlamaktadır. Sarsılmaz (2017), bu yöntemi zeminlerin susuzlaştırılması olarakta tarif etmiştir. İri daneli zeminlerde sondaj kuyularından pompalama yoluyla su seviyesi düşürülürken, ince daneli zeminlerde ise uzun vadeli ön yüklemeye veya elektriksel kuvvetler uygulayarak yeraltı su seviyesi düşürülmektedir.

Fiziksel ve kimyasal iyileştirme, yüzeydeki veya derinlerdeki zeminin katkı maddeleri katılarak fiziksel olarak karıştırılması veya zemin içerisindeki boşluklara enjekte edilmesi şeklinde açıklanabilir. Katkı maddeleri endüstriyel yan ürünler ve atıklar, çimentolar ve zeminle tepkimeye giren kimyasallar olarak örneklendirilebilir (Sarsılmaz, 2017).

Şahan (2016) ise iyileştirme yöntemini, uygulanacak derinliğe bağlı olarak; derin ve yüzeysel iyileştirme yöntemi olarak iki gruba ayırmıştır.

Derin zemin iyileştirme yöntemlerine; elektro-osmoz, jet grout, patlatma, taş kolonlar, ön yüklemeye ve düşey drenler gibi yöntemler örnek verilebilir. Yüzeysel zemin iyileştirme yöntemlerine ise; drenaj, kompaksiyon, çimento/kireç veya bitüm ile stabilizasyon, kireç-uçucu kül ile stabilizasyon ve fiberler ile stabilizasyon yöntemleri örnek verilebilir. Son dönemlerde geleneksel iyileştirme yöntemlerine alternatif olarak katkı malzemeleriyle zemin iyileştirme çalışmalarının sayısı da giderek artmaktadır.

2.3. Katkı Malzemesi ile Zemin İyileştirme Çalışmaları

Bu tez çalışmasında bazalt fiberlerin kum zemin içerisinde katkı malzemesi olarak kullanılması planlandığından bu başlık altında katkı malzemesi ile zemin iyileştirme yöntemleri literatür örnekleriyle desteklenerek açıklanmıştır.

2.3.1. Kireç katkısı

Kireç stabilizasyonu, zemine belli fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip toz halinde sönmüş kireç (Ca(OH)_2), sönmemiş kireç (CaO) veya yüksek kalsiyumlu kireç ($\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{MgO}$ ve $\text{CaO} \cdot \text{MgO}$) katılmasıyla zeminin karıştırılması işlemidir. Demiryolu ve karayolu alt yapısını oluşturan taban zemininde, dolgu veya üstyapı temellerini iyileştirmede sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem genellikle ince daneli zeminlerde oldukça önemli iyileştirmeler meydana getirir (Kavak ve ark, 2008;

Kızılçelik, 2010). Zemin ile kireç karışımı sonucunda katyon değişimi ve floküsyon gibi bir takım reaksiyonlar meydana gelmektedir. Bu reaksiyonların bütünü puzzolonik reaksiyonlar olarak adlandırılmaktadır (Çetin, 2011).

Puzzolonik reaksiyonlar zeminde yapısal değişikliklere yol açarak zemini sertleştirir ve mukavemetinin artmasını sağlar.

Geçkil ve ark. (2019) yapmış oldukları çalışmada kil zemine kireç katılmasıyla kilin dayanımındaki etkisini incelemişlerdir. Kil zemine ağırlıkça %2.5, %5, %7.5, %10, %15 ve %20 oranında kireç ekleyerek homojen şekilde karıştırdıktan sonra numuneler üzerinde kıvam limitleri, kompaksiyon, serbest basınç ve CBR (Kaliforniya taşıma gücü oranı) deneyleri uygulamışlardır. Elde edilen sonuçlar kapsamında kireç oranı arttıkça numunelerdeki optimum su muhtevası artmış, maksimum kuru yoğunluk ve plastisite indeksi azalmıştır. Yine aynı karışım oranlarında hazırlanan kil numuneleri 7 ve 28 günlük kür sürelerine tabi tutularak serbest basınç deneyi yapıldığında en yüksek serbest basınç mukavemeti değerine %5 kireç oranında ulaşılmıştır. Ayrıca yine aynı kireç oranında aynı kür sürelerine tabi tutularak gerçekleştirilen CBR deneyleri sonucunda katkısız kil zeminine göre CBR değerleri 7 günlük kür süresinde 1.37 kat 28 günlük kür süresinde 2.08 kat yüksek sonuç vermiştir. Bu deneysel veriler ışığında kirecin kil zemine katılmasıyla dayanımında ciddi oranda artışlar olduğu ve suya karşı hassasiyetinin düştüğü sonucuna varılmıştır.

Kızılçelik (2010), Kocaeli ili Uzunçiftlik bölgesinden aldığı yüksek plastisiteli ve yüksek su muhtevasına sahip kil zemine hem sönmüş hemde sönmemiş kireç katarak stabilizasyon yönüyle ne oranda fayda sağlayacağını araştırmıştır. Öncelikle kil numunesi üzerinde fiziksel deneyler gerçekleştirilerek uygun kireç karışım oranına karar verilmiştir. Sonrasında katkılı ve katkısız numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra kil doğal su muhtevasında sönmüş ve sönmemiş kireç eklenerek sonuçlar optimum su muhtevasında %5 kireçli durumda bulunan mukavemetler ile kıyas edilmiştir. Karşılaştırmalar sonucunda 28 günlük kür süresinde kireç katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetinin 120 kPa'dan 1730 kPa'ya ulaştığı kaydedilmiştir. Ayrıca yaş CBR deneyleri değeri %4'ten %23'e kadar çıkmıştır. Kireç katkılı numunelerdeki boy kısalma oranı ise %15'ten %1.5'e kadar düşmüştür. Araştırmacı bu çalışmada mukavemet artışları ve deformasyon azalışları

sayesinde yol alt yapı çalışmalarında kireç karışımı kullanılmasının olumlu sonuçlar verebileceğini ve maliyetlerde azalma sağlayabileceğini göstermiştir.

Kavak ve ark. (2008), Karayollarının bölünmüş yol çalışmaları kapsamında kireç stabilizasyonunun 14 m genişliğinde 360 m uzunluğunda gerçek bir yol üzerindeki etkisini araştırmışlardır. İyileştirme uygulamaları arazi ortamında yapılmış ve çalışmalara başlamadan önce zeminlerin geoteknik özellikleri bulunmuştur. Ayrıca uygun kireç oranını belirlemek için Atterberg limitleri ve CBR değerleri kullanılarak %5 kireç oranına karar verilmiştir. Arazi yol tabanında bulunan yüksek plastisiteli kil (CH), %5 oranında kireç ile karıştırılarak 20'şer cm'lik 2 tabaka halinde uygulanmıştır. Uygulamadan sonra arazi CBR, plaka yükleme ve yoğunluk deneyleri verileri karşılaştırılmıştır. Uygulama öncesinde %11 olan arazi CBR değeri kireç katkısıyla %48 ile %56 değerlerine kadar artmış, 28 gün sonra alınan sonuçlarda ise %117 olarak saptanmıştır. Plaka yükleme deney sonuçları değerlendirildiğinde kalıcı oturma değerleri 22.2 mm'den 1.6 mm'ye kadar düşmüş yatak katsayıları ise 10 kattan fazla artmıştır. Araştırmacılar tüm bu sonuçları değerlendirdiğinde kireç stabilizasyonun olumlu etkisini açıkça gözlemlemişlerdir.

Tüylüce (2010), Bursa ili Gemlik bölgesinden aldığı deniz kilini sönmüş ve sönmemiş kireç katkısıyla iyileştirerek karada dolgu çalışmalarında kullanılabilirliğini araştırmıştır. Kireç katkısı kil zemine optimum su muhtevasında ağırlıkça %5 oranında uygulanarak iki aşamada meydana gelmektedir. İlk aşamada zeminin geoteknik özellikleri ve kıvam limitleri kullanılarak optimum kireç oranı bulunmuştur. Proktor ve Harvard proktor deneyleri ile optimum su muhtevaları, serbest basınç ve CBR deneyleri ile zeminin dayanımları ölçülmüştür. İkinci aşamada ise kimyasal analizler, SEM ve XRD analizleri ile zeminin minerolojik özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre kireç katkılı numunelerde mukavemet artışları olduğu ve bu sayede arazi şartlarında dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi belirlenmiştir. Ayrıca dolgu çalışmalarında ekonomik ve kolay uygulanabilir bir yöntem olduğu anlaşılmıştır.

2.3.2. Çimento katkısı

İyi bir hidrolik bağlayıcı madde olan çimento, kireçtaşı-kil karışımının özel fırınlarda ısıtılmasıyla öğütülerek elde edilir. Bağlayıcı özelliği yönüyle zemine katıldığında iyi

bir stabilizasyon mekanizması oluşturmaktadır. Çimento zemine karıştırıldığında boşluklarda karşılaştığı su ile tepkimeye girerek bir takım kimyasal reaksiyonlar meydana getirir. Bu reaksiyona hidrasyon denmektedir. Hidrasyon sonucu çimento sertleşir ve zemin daneleri arasında güçlü bir bağ oluşturarak zeminin mukavemetini önemli ölçüde artırır. Başta kumlu, siltli ve düşük plastisiteli killer olmak üzere organik zeminler dışında tüm zemin cinsleri çimento ile stabilizasyona elverişlidir (Bildik, 2017; Şahbaz, 2020).

Özellikle yol ve hava meydanları alt yapılarının iyileştirilmesinde etkin rol oynayan çimento katkısının killi zeminlerin mukavemeti üzerindeki artışlarını incelemek için Kılıç (2008) bir takım deneysel çalışmalar yürütmüştür. İngiltere'nin West Ashling, Hamble ve Emsworth bölgelerinden elde edilen kuru kile ağırlıkça %6, %10, %15, %20 ve %25 oranında çimento karıştırılarak numuneler hazırlamıştır. %6, %10, %15 çimento katkılı numuneler üzerinde veyn ve üç eksenli basınç deneyleri, %20 ve %25 çimento katkılı numuneler üzerinde ise 7, 14 ve 28 günlük kür süresine tabi tutularak serbest basınç deneyleri yapılmıştır.

3 farklı kile farklı oranlarda çimento eklenerek yapılan veyn deneylerinin sonuçlarını incelediğinde drenajsız kayma mukavemetinin %10 çimento oranına kadar artış gösterdiği sonraki oranlarda ise meydana gelen artışların düşük kaldığını gözlemlemiştir. Araştırmacı tarafından üç eksenli basınç deneylerinin sonuçları incelendiğinde West Ashling kili ve Hamble kiline karıştırılan çimentonun yüzde oranı arttıkça drenajsız kayma mukavemeti değerleride belirgin ölçüde artmıştır. Fakat Emsworth kiline karıştırılan çimento yüzde oranları %6 oranına kadar zeminin drenajsız kayma mukavemeti değeri arttırdığı bu değerden sonra olumsuz etkilediği sonucuna ulaşılmıştır. Son olarak %20 ve %25 oranında çimento katkısıyla gerçekleştirilen serbest basınç deneyleri sonuçları incelendiğinde, serbest basınç mukavemetlerinde kür süresi arttıkça bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Tüm deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde 3 farklı kil zeminine farklı oranlarda çimento katılmasıyla yapılan stabilizasyonun sonucunda mukavemetleri üzerinde bir artış tespit edilmiştir.

Sariosseri ve Muhunthan (2008), Washington eyaletinin Aberdeen ve Everett bölgelerinden alınan ve geoteknik açıdan sorunlu olan zeminlerin kuru ağırlığına %5, %10, %15 ve %20 oranında çimento katarak zeminin stabilizasyonuna etkisini

araştırmıştır. Araştırmalar sonucunda optimum su içeriğinden daha yüksek olan zemin ortamının kuruma hızında, serbest basınç mukavemetinde ve kayma mukavemetinde önemli gelişmeler kaydetmişlerdir.

Yıldız (2020), yapmış olduğu deneysel çalışmalarda kil zeminin çimento ile stabilizasyonunu araştırmıştır. Kil numunesi üzerinde bir takım fiziksel deneyler tatbik ederek geoteknik özelliklerini belirlemiştir. Daha sonra kil zemine %8, %10 ve %12 oranında çimento katarak hazırladığı numuneleri anlık, 1, 7 ve 28 günlük süreler neticesinde serbest basınç deneylerine tabi tutmuştur. Deney verileri sonucunda katkısız kil numuneye göre çimento katkılı kil numunelerinin su muhtevasında ve zamana bağlı olarak mukavemet değerlerinde artış olduğunu ortaya koymuştur. Araştırmacı en iyi mukavemet artışını 28 günlük kür süresinde %10 çimento oranında elde etmiş ve çalışmalar sonucunda zemin stabilizasyonunda çimento katkısının önemini ortaya koymuştur.

Kilit ve ark. (2021), şişme potansiyeline sahip killerin iyileştirilmesinde Portland Kompoze çimentosunun etkisini araştırmışlardır. Çimento katkısı-şişme yüzdesi ilişkisi, şişme yüzdesi-su içeriği değişimi ve şişme yüzdesinin zamanla değişimini incelemek amacıyla kile %0, %2 ve %4 oranında çimento katarak hazırlanan numuneler üzerinde ödometre cihazıyla serbest şişme yüzdesi deneyleri uygulamışlardır. Araştırmacılar deney sonuçlarını değerlendirdiğinde kile çimento katmanın şişme potansiyelini azalttığını ve %2 çimento oranından yüksek oranlarda katılmasıyla daha etkili sonuçlar verdiğini bulmuştur.

2.3.3. Bitüm (asfalt) katkısı

Ham madde olarak doğadan elde edilmesinin yanı sıra ham petrolün damıtılmasıyla da imal edilebilen bitüm; katı, yarı katı veya sıvı halde bulunabilen bağlayıcı bir maddedir. Bağlayıcı olma özelliği ile ince daneli ve granüler zeminlerde kohezyonu arttırarak geçirimsiz bir tabaka oluşmasını sağlar. Geniş bir uygulama alanına sahip olan bitüm, yol altyapı çalışmalarında ve bakımında, zemin stabilizasyonunda ve yalıtım maddesi olarak kullanılmaktadır (Bildik, 2017; Diallo, 2019). Bitümle iyileştirilecek zeminlerde dane boyutu küçüldükçe bitüme olan ihtiyaç artmaktadır ve bitümün zemin içinde homojen şekilde karıştırılması zorlaşmaktadır. Bu nedenle iri daneli zeminlerde başarı oranı daha yüksektir (Umar ve Ağar, 1985). Birçok araştırma

sonucunda zeminlerin bitüm ile stabilizasyonunda kumlu zeminlerde bitüm oranı %4-10, çakıl ve kumlu-çakıllı zeminlerde bitüm oranı %2-6 ve ince daneli zeminlerde bitüm oranı %4-8 oranında değişmektedir (Witczak ve Yoder, 1975).

Yıldırım ve ark. (2006), iki çeşit zemin numunesinin su muhtevaları %10 olacak şekilde hazırlamışlar ve içerisine %1, 2, 3, 4, 5 oranlarında 120°C sıcaklıkta MC-800 katbek asfaltı (bitümü) karıştırarak zemin-bitüm numuneleri üzerinde bir takım deneyler uygulamışlardır. Sonrasında 7 gün süreyle nemli bir ortamda kür edilmiş karışımlar üzerinde serbest basınç deneyleri yapmışlardır. 1 nolu zemin-asfalt karışımının optimum asfalt miktarı %4, maksimum serbest basınç mukavemeti 3.33 kg/cm² olarak tayin edilmiştir. 2 nolu zemin-asfalt karışımının ise optimum asfalt miktarı %3, maksimum serbest basınç mukavemeti 4.09 kg/cm² olarak tayin edilmiştir. Araştırmacılar 2 nolu zeminin deney sonuçları asfalt stabilizasyonuna daha uygun olduğu için, katkısız ve asfalt katkılı olarak numuneler hazırlayarak CBR deneyleri yapmışlardır. 2 nolu katkısız zeminin CBR değeri %11, asfalt katkılı numunenin CBR değeri ise %20 olarak bulunmuştur. Deney verilerinden yola çıkarak örnek alınan bir yol kesitinin üst yapı kalınlıkları AASHO'ya göre hesaplanmış ve asfalt ile yapılan stabilizasyon yönteminde üst yapı maliyetinin %5.2 daha ekonomik olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Selçuk (2021) yapmış olduğu çalışmada dinamik deprem yükleri altındaki kum zeminleri bitüm ve liflerle stabilize ederek kum zeminlerin dinamik özelliklerindeki değişimleri incelemiştir. Bu amaçla yüksek sönüm oranına sahip kum, bitüm ve çeşitli liflerle stabilize edilmiştir. Kum zemine farklı oranlarda bazalt, polipropilen ve selüloz lifleri ve farklı oranlarda bitüm eklenerek ayrı ayrı deney numuneleri oluşturulmuştur. Daha sonra bu numuneler üzerinde çevrimsel basit kesme deneyleri uygulanarak farklı oranlardaki polipropilen lifli, bazalt lifli ve selüloz lifli numunelerin dinamik özellikleri kıyaslanarak hangisinin en iyi sonucu verdiği saptanmıştır. Araştırmacı elde edilen veriler sonucunda selüloz lifi için bitüm oranının %3'ü kadar lif en yüksek sönüm oranı olarak belirlenmiş ve bu sönüm oranını %45 olarak bulmuştur. Polipropilen lifi için bitüm oranının %1'i kadar lif en yüksek sönüm oranını verdiği ve bu oranın %44.6 olduğu sonucuna ulaşmıştır. Son olarak en yüksek sönüm oranını bazalt lifli numunede %47 olarak tayin etmiştir. Ek olarak en yüksek kayma modülü bazalt lifli karışımda 11.8 Mpa olarak hesaplanmıştır.

2.3.4. Çelikhane cürufu katkısı

Çelikhane cürufu, elektrik ark ocaklarında (EAO), indüksiyon ocaklarında (İO) veya bazik oksijen fırınlarında 1300° ve üstü sıcaklıklarda çelik üretimi sırasında metal eriğinin arıtılması ve oksitlenmesi sonucu açığa çıkar. Endüstriyel bir atık ürünü olarak nitelendirilir ve yoğunluğu çelikten düşüktür. Çelik üretimi yapan sanayi kuruluşlarında bir ton ham çelikten yaklaşık 150-200 kg çelikhane cürufu yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Türkiye genelinde 2014 yılında elde edilen verilere göre yaklaşık 5.4 milyon ton çelikhane cürufu açığa çıkarken Dünya genelinde bu rakam yılda elli milyon tona ulaşmaktadır. Şekil 2.3'te 2014 yılında Türkiye'de Çelikhane cürufu, atığı ve geri kazanımına dair miktarlar ton cinsinden verilmiştir (Karadağ ve ark, 2020; Türkiye Çelik Üreticileri Derneği, 2015; Motz ve Geiseler, 2001; Terzi, 2021).

| | Çelikhane Cürufu | Atık/Bertaraf | Geri Kazanım |
|-----------|------------------|---------------|--------------|
| Kocaeli | 874.327 | 494.117 | 380.210 |
| Bursa | 35.500 | 7.500 | 28.000 |
| Tekirdağ | 132.000 | 47.000 | 85.000 |
| Canakkale | 459.343 | 50.529 | 408.814 |
| Bilecik | 8.400 | 4.000 | 4.400 |
| İzmir | 490.580 | 182.907 | 307.673 |
| Zonguldak | 449.848 | 261.327 | 188.521 |
| Karabük | 266.760 | 0 | 243.540 |
| Samsun | 150.206 | 150.206 | 0 |
| Osmaniye | 619.819 | 608.745 | 11.074 |
| Hatay | 1.131.695 | 901.155 | 230.540 |

Şekil 2.3. 2014 Yılı Çelikhane Cürufu ile Atık ve Geri Kazanım Miktarları*(ton) (Türkiye Çelik Üreticileri Derneği, 2015).

Her geçen gün çevre bilincinin artmasıyla endüstriyel atıkların geri dönüşümü çevresel ve ekonomik yarar açısından ilgi görmektedir. Çelikhane cürufu inşaat uygulamalarında öncelikli olarak yol çalışmalarında, zemin iyileştirmede, çimento ve beton endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Türedi ve ark. (2017) yapmış oldukları çalışmada kil zemine çelikhane cürufu (BOS) katarak CBR değeri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. CBR deneylerinden önce doğal kil numunesi üzerinde fiziksel deneyler gerçekleştirerek kil zeminin geoteknik özelliklerini belirlemişlerdir. Sonrasında kil zemine %0, %5, %10, %15, %20, %50,

%75 ve %100 oranlarında BOS karıştırarak hazırladıkları numuneler üzerinde CBR deneyleri yaparak ve 2.5 mm ve 5.0 mm oturmalarına karşılık gelen CBR değerlerini hesaplamışlardır. Elde edilen veriler ışığında doğal kil numunesinin zayıf zemin olduğu ve ıslah edilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır. BOS'un farklı oranlarda kil zemine katılmasıyla hazırlanan numunelerin CBR değerlerinde yaklaşık 3 kat bir artış olduğunu ve ortalama %30-40 civarındaki BOS katkısının en iyi CBR değerlerini verdiğini ortaya koymuşlardır. Buna göre yan ürün olarak üretilen BOS'un geoteknik mühendisliği uygulama alanlarında alternatif bir malzeme oluşturabileceği sonucuna varmışlardır.

Fırat ve ark. (2020) karayolu kaplamasında alt temel malzemesi olarak BOS (çelikhane cürufu) ve uçucu külün kullanımını araştırmışlardır. Araştırmacılar kaolin kilini, farklı oranlarda (%0, %15, %20 ve %25) ağırlıkça çelikhane cürufunu ve sabit oranda (%5) kireci ve uçucu külü karıştırarak numuneler hazırlamışlardır. Bu karışımları 1, 7 ve 28 gün ve bazılarını 56 gün kür sürelerine tabi tutarak serbest basınç ve CBR deneyleri tahkik etmişlerdir. Deney sonuçlarına göre serbest basınç ve CBR değerlerinde önemli artışlar kaydetmişlerdir. Araştırmacılar sonuç olarak çelikhane cürufunun yol temel ve temel altı veya malzemesi olarak kullanılabilirliği sonucuna ulaşmışlardır.

Bilgen ve ark. (2012) yapmış oldukları çalışmada killi zeminlere çelikhane cürufu (Basic Oxygen Furnace Slag-BOS) katarak geoteknik özellikleri üzerindeki etkisini, kireç ile etkileşimini ve optimum karışım oranını araştırmışlardır. Adapazarı Uzunçiftlik bölgesinden alınan düşük plastisiteli kile farklı oranlarda çelikhane cürufu ve kireç ekleyerek hazırladıkları numuneler üzerinde ASTM D4609 standartlarına uygun olarak deneyler tahkik etmişlerdir. Kireç karışım oranını belirlemek amacıyla asitik denge (pH) yöntemini uygulayarak en uygun pH değerini (12.4) veren kireç miktarını %5 olarak hesaplamışlardır. Belirlenen bu oranı baz alarak çelikhane cürufu-kireç karışımı 1/1.5 olacak şekilde ayarlamışlardır. Sonuç olarak numunelerin kireç oranları %4 ve %5 olarak alınmış ve çelikhane cürufuda bu oranın 1.5 katı olacak şekilde ayarlanmıştır. Hazırlanan numuneler optimum su muhtevasında olacak şekilde 1, 7 ve 28 gün süreyle kür edilerek serbest basınç deneylerine tabi tutulmuşlardır. Ayrıca numunelerin 28 günlük yaş CBR değerlerini elde etmek için CBR deneyleri uygulamışlardır. Araştırmacılar deney sonuçlarını incelediğinde, katkısız kilin serbest basınç değerini 279 kPa olarak bulmuş ve bu basınç altında %15 oranında birim şekil

değiştirme yaptığı sonucuna varmışlardır. Kil + %3.33 BOS numunesinin 28 günlük serbest basınç değeri 960 kPa, kil + %5 kireç numunesinin 28 günlük serbest basınç değeri 2700 kPa, kil + %5 kireç + %3.33 BOS numunesinin 28 günlük serbest basınç değeri 4000 kPa olarak bulunmuş ve katkıları sayesinde birim şekil değiştirmenin %2'ye kadar düştüğü hesaplanmıştır. Lakin %5 kireç, %7.5 BOS katkılı kil numunesinin dayanım değeri 2900 kPa olarak kaydedilmiştir. Bununla birlikte BOS katkısının optimum değerinin %3.33 olması gerektiği sonucuna varmışlardır. CBR değerleri ele alındığında katkısız kil, %3.33 BOS katkılı, %5 kireç katkılı ve %3.33 BOS + %5 kireç katkılı numunelerin 28 günlük CBR değerleri sırasıyla 6, 21 ve 135 olarak hesaplanmış fakat %5 kireç, %7.5 BOS katkılı kil numunesinin 28 günlük CBR değerinin 120'ye düştüğü gözlemlenmiştir. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde araştırmacılar BOS ve kireç katkısının dayanımlarda önce bir artışa sonra bir azalmaya neden olduğunu buna bakılarak bir optimum değerinin olması gerektiği sonucuna varmışlardır. Bu araştırmada optimum oran %3.33 BOS + %5 kireç olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak çelikhane cürufu ve kireç katkılı numunenin yol yapımında kullanıma uygun olduğu ve kilin mukavemet özellikleri üzerinde olumlu artışlar gösterdiği kanıtlanmıştır.

Yıllık sıcaklık farkının fazla olduğu, soğuk iklimin etkisiyle donma ve çözünme olaylarının sık görüldüğü bölgelerde özellikle karayolu ve demiryolu gibi yapıların inşa edildiği zemin gruplarında donma-çözünmenin etkisiyle dayanımlarında düşüşler meydana gelmektedir. Bu durumdan yola çıkarak Öngü (2017), yapmış olduğu çalışmada killi zemine %3, %6, %9, %12, %15 ve %20 oranlarında çelikhane cürufu karıştırarak hazırladığı numuneler üzerinde donma-çözünme deneyi, donma-çözünmeye karşı direncin tayini ve Magnezyum Sülfat deneyleri gerçekleştirmiştir. Deneyler sonucundaki veriler kapsamlı şekilde karşılaştırıldığında kile karıştırılan çelikhane cürufunun en optimum değerleri %9 oranında verdiği tespit edilmiştir. Ayrıca deney sonuçlarına dayanarak çelikhane cürufu katkısının kil zeminin mukavemet ve donma-çözünme aşınmalarına karşı direncinde dayanım arttırıcı bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

2.3.5. Atık lastik katkısı

Doğada ayrışımı zor olan ve dayanıklı yüksek molekül yapısına sahip lastikler, doğal ve sentetik kauçuklardan üretilir. Ulaşım ağında kullanılan araçların lastikleri,

kullanım ömrünü tamamladıktan sonra çevrede lastik atığı oluşumu zamanla artmaktadır. Bertaraf edilemeyecek ve depolanamayacak kadar fazla olan atık lastikleri farklı boyutlarda yeniden işleyerek endüstri ve inşaat gibi uygulama alanlarında tekrar kullanıma sunmak zorunluluk haline gelmiştir. Geoteknik mühendisliğinde kullanılan atık lastiklerin kayma mukavemeti düşük olduğu için zeminlerle farklı oranlarda karıştırıldığında kayma mukavemeti problemlerine karşı iyi performans göstermektedir (Zornberg ve ark, 2004). Literatürde katkı malzemeleriyle zemin iyileştirme yöntemlerine alternatif olan atık lastikler ekonomik oluşu sebebiyle de ön plana çıkmaktadır.

Atık lastiklerin çevreye verdiği zararı en aza indirmek ve zemin iyileştirme yönteminde ekonomi sağlamak amacıyla Enginer ve ark. (2019) bir araştırma yapmışlardır. Bu araştırma kapsamında lastik atık olarak nitelendirilen poliüretan malzemesini parçalar halinde kum (SP) zemine hacimce %0, %5, %10, %20, %25, %50 ve %75 oranlarında ekleyerek hazırlanmış oldukları numuneler üzerinde CBR deneyleri tahkik ederek 2.5 mm ve 5.0 mm oturmalara karşılık gelen yük değerlerini hesaplamışlardır. Araştırmacılar CBR deney sonuçlarını karşılaştırdığında kum zemine %20 oranına kadar katılan lastik atıklarının taşıma gücünde artışlar olduğunu kaydetmişlerdir. %25 katkı oranı ve sonraki oranlarda ise CBR değerlerinin düştüğünü ve katkısız kum zemininin CBR değerinde altında olduğu gözlemlenmiştir.

Keskin ve Laman (2012), dere yatağından alınan kum zemine hacimce %0, %5, %10, %15, %20, %30, %40 ve %50 oranında lastik parçacıkları karıştırarak hazırladıkları ve sıklık derecesi $D_r = 65$ olan numuneler üzerinde kesme kutusu deneyleri yapmışlardır. Sonuçlar karşılaştırıldığında katkılı numunelerin kayma mukavemeti parametreleri katkısız kumun kayma mukavemeti parametrelerine göre daha yüksek bir değer göstermektedir. Kayma mukavemeti değerlerindeki en yüksek artış %10 ve %15 oranında atık lastiğin kum zemine karıştırılmasından elde edilmiş olup %20 ve sonraki atık lastik oranlarında ise katkısız kum numunesi kayma mukavemeti değerlerine göre daha düşük çıkmıştır. Kohezyon değerlerine bakıldığında tüm atık lastik karışımli numunelerin değerleri katkısız kum numunesinin kohezyon değerinden yüksek çıkarak en iyi değer %30 atık lastik oranında olduğu gözlemlenmiştir. Diğer yönden kayma mukavemeti açısı (ϕ) %15 ve önceki atık lastik oranlarında artış göstererek %15 oranından sonra ϕ değerinin artış miktarında azalmalar meydana

gelmiştir. Ayrıca %10-15 oranındaki atık lastik katkıli numunelerin ϕ değeri katkısız kuma göre yaklaşık %10 artış göstermiştir. Kesme kutusu deneylerinden elde edilen veriler değerlendirildiğinde atık lastik katkısının kum zemine optimum karıştırılma yüzdesi hacimce %10 ile %15 olarak kabul edilmiştir. Çalışmada lastik atık parçacıklarının kum zemindeki oranı arttıkça karışımın ağırlığının azaldığını ve kayma mukavemetinde artışlar olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Foose ve ark. (1996), atık lastik parçacıklarıyla güçlendirilmiş kum zeminin fizibilitesini araştırmışlardır. Temiz kuma atık lastik parçacıkları ekleyerek hazırladıkları numuneler üzerinde büyük ölçekli kesme kutusu deneyleri tayin etmişlerdir. Kesme kutusu deneylerinde normal gerilme, kum birim hacim ağırlığı, lastik parçacıklarının içeriği, uzunluğu ve yönü gibi faktörlerin kesme mukavemeti üzerindeki etkilerini inceleyerek normal gerilme, lastik içeriği ve kumun birim hacim ağırlığı faktörlerinin dayanımdaki etkisinin daha önemli olduğu sonucuna varmışlardır. Bu faktörlerden herhangi birinin artması kayma direnci açısı ϕ 'nin artmasını sağlamıştır. Ayrıca her durumda lastik parçacıklarının kuma eklenmesiyle kayma mukavemetlerinde artışların olduğu kaydedilmiştir. Araştırmacılar aynı birim hacim ağırlıkta hazırladıkları katkısız kum ve lastik katkıli numunelerin içsel sürtünme açılarını karşılaştırdıklarında saf kumun içsel sürtünme açısının 34° 'den 67° 'ye kadar yükseldiğini elde etmişlerdir.

Zornberg ve ark. (2004), granüler dolgular içindeki lastik parçalarının optimum içeriğini ve en-boy oranını belirlemek amacıyla %100 kum, %100 lastik ve belli oranlarda hazırlanmış kum-lastik karışımları üzerinde büyük ölçekli üç eksenli basınç deneyleri yürütmüşlerdir. Sonuçlar incelendiğinde karışımlardaki lastik içeriğinin artmasıyla kayma mukavemeti değerlerinde artışlar olduğu ve maksimum değere %35 lastik-%65 kum karışımı oranında ulaşıldığı sonucuna varılmıştır.

Edinçliler ve Ayhan (2010), kum zemine atık lastik katarak hazırlanmış olduğu karışımlar üzerinde büyük ölçekli kesme kutusu deneyleri uygulayarak kesme mukavemetindeki değişimleri incelemiştir. Karışımlarda granül lastik (TC) ve kırpıntı lastik (TB) olmak üzere iki tip atık lastik kullanarak kırpıntı lastikleri kendi içinde en/boy oranına göre TB1 ve TB2 olarak kategorize etmişlerdir. TB1, 2.0-4.0 kalınlığında 8-10 mm boyunda; TB2 4.0-5.0 mm kalınlığında 10-50 mm boyunda olacak şekilde tanımlanmış ve saf kuma TC, TB1 ve TB2 tipindeki lastikler ağırlıkça

%10, %20, %30 oranlarında katılarak hazırlanan numuneler deneye tabi tutulmuşlardır. Çalışma sonucunda kesme mukavemetinde en etkili değişkenlerin normal gerilme, en/boy oranı ve atık lastik oranı olduğu sonucuna varmışlardır. Ek olarak lastiğin en/boy oranı arttıkça kesme mukavemeti değerini de orantılı şekilde arttırdığını ve kuma TB2 lastiğinin %20 oranında eklenmesiyle maksimum kesme mukavemetine ulaşıldığı ortaya koyulmuştur.

2.3.6. Atık gazbeton katkısı

Gazbeton; betonarme, çelik ve ahşap gibi çeşitli yapı sistemlerinde duvar örgü malzemesi olarak tercih edilir. Bu malzemenin farklı nedenlerle zayıfata uğraması sonucu açığa çıkan gazbeton atıklarının zemin iyileştirilmesinde kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla Alpyürür ve Şenol (2018) bir takım deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. Ögütülen gazbeton, yüksek plastisiteli bentonit kile (CH), düşük plastisiteli kile (CL) ve kum zeminlere ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 oranlarında karıştırılmış ve karışımlar üzerinde serbest basınç, kesme kutusu, Kaliforniya taşıma oranı ve şişme basıncı deneyleri tahkik edilmiştir. Araştırmacılar çalışmalarda şu sonuçlara ulaşmışlardır.

- Yüksek plastisiteli bentonit kiline %25 oranında gazbeton katılmasıyla, katkısız kile göre serbest basınç dayanımı %41 ve CBR değeri %49 artış göstermiş olup şişme yüzdesi ise %65 oranında düşüş göstermiştir.
- Düşük plastisiteli kile %15 oranında gazbeton katılmasıyla katkısız kile göre serbest basınç dayanımı %25 artmış, %10 oranında gazbeton katılmasıyla CBR değeri %68 oranında bir artış göstermiştir.
- Farklı sıklık değerlerindeki kuma gazbeton katılmasıyla yapılan kesme kutusu deneyleri sonuçlarına göre optimum bir artış oranı gözlemlenmemiştir. En iyi kayma mukavemeti açısı değerine, %70 rölatif sıklıktaki kuma %5 gazbeton katılmasıyla ulaşılmıştır. Bu değer yalın kumda 40° iken katkılı kumda 47°'ye yükselmiştir.

Araştırmacılar çalışmaları kapsamında atık gazbeton maddesinin zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılmasıyla problemlili zeminin geoteknik özelliklerini belli ölçüde iyileştirebileceğini öne sürmüşlerdir.

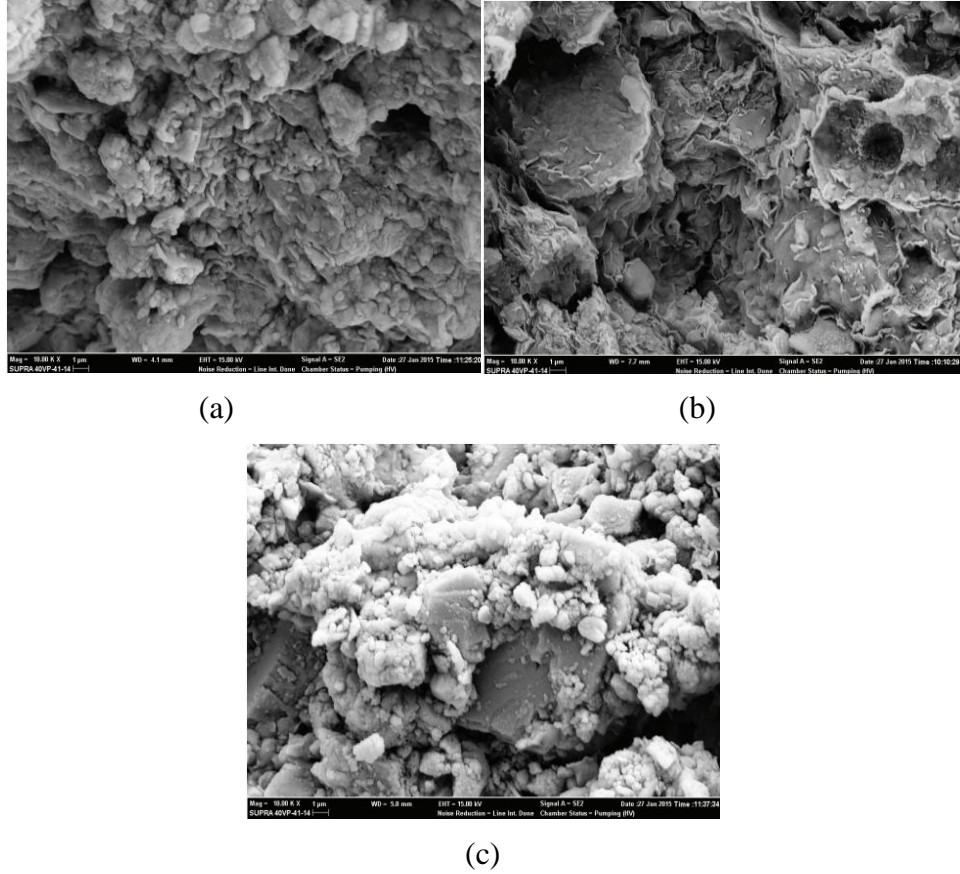
2.3.7. Mermer tozu ve uçucu kül katkısı

Mermer tozu, ocaklardan çıkarılan moloz büyüklüğündeki mermer parçalarının fabrikalarda işlenmesi sonucunda çökeltme havuzlarında biriken yan üründür. Mermer tozu yapısında kalsit (CaCO_3) içermesi ve tanecik boyutu çok küçük olmasından dolayı ince daneli zeminlerin iyileştirilmesinde katkı malzemesi olarak kirece bir alternatif olarak değerlendirilebilir (Cömert, 2012; Sarkar ve ark, 2016; Terzi, 2021).

Zorluer ve Gücek (2019), zemin stabilizasyonu çalışmalarına katkı sağlamak amacıyla şişme potansiyeline sahip killi zemine mermer tozu karıştırarak yapmış olduğu deneysel çalışmalarda mermer tozunun şişme potansiyeli yüzdelerindeki değişimlerini incelemiştir. Çalışmada yüksek plastisiteli inorganik kil (CH) ve bu kile %10 oranında şişme özelliği olan montmorillonit kili eklenerek iki tip zemin oluşturulmuştur. Mermer tozunun en optimum değerini belirlemek için %0, %3, %5, %10, %15 oranında zemine karıştırmışlar ve numuneleri optimum su muhtevalarında hazırlamışlardır. Hazırlanan numunelere ödometre aletinde şişme deneyleri yaparak şişme potansiyeli yüzdeleri karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar yüksek plastisiteli inorganik kile (CH) mermer tozu katılmasıyla şişme yüzdesinde yaklaşık %60 oranında bir düşüş tespit ederken şişme potansiyeli olan montmorillonit katkılı kile mermer tozu katılmasıyla ise şişme yüzdesinde yaklaşık %36 oranında bir düşüş tespit etmişlerdir. Böylece mermer tozunun zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılmasıyla hem çevreye hemde ekonomiye olumlu anlamda katkı sağlayacağını öne sürmüşlerdir.

Görgün ve Ural (2015) mermer tozu katkısının kilin dayanımı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla kompaksiyon deneyleri, serbest basınç deneyleri ve SEM (taramalı elektron mikroskobu) incelemeleri yapmışlardır. Araştırma kapsamında kile %10 ve %20 oranında mermer tozu katarak hazırladıkları numunelerin optimum su muhtevalarını ve kuru birim hacim ağırlıklarını bulmak için kompaksiyon deneyleri yapmışlardır. Sonrasında optimum su muhtevalarında hazırladıkları numuneleri 0 ve 7 günlük kür sürelerine tabi tutarak serbest basınç deneyleri tahkik etmişlerdir. Deney sonucunda numunelere SEM ile bakarak iç yapısındaki değişiklikleri incelemiştir. Çalışmalar sonucunda elde edilen veriler incelendiğinde kile mermer tozu katılmasıyla serbest basınç mukavemetlerinde bir artış olduğu ve kür süresinin bu artışa daha da olumlu bir katkı sağladığı görülmüştür. Ayrıca SEM görüntülerine göre kile katılan

mermer tozu içeriğinin artmasıyla numunelerin iç yapısındaki topaklanmalarında arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.4.). Araştırmacılar mermer tozu atığının ülke ekonomisine kazandırılması ve çevresel zararlarının minimuma indirilmesi yönüyle zeminlerin iyileştirilmesinde katkı maddesi olarak kullanılmasının uygun olduğu görüşünü ileri sürmüşlerdir.



Şekil 2.4. SEM görüntüleri (a) %90 kil + %10 mermer tozu (kürsüz), (b) %90 kil + %10 mermer tozu (7 günlük kür), (c) %80 kil + %20 mermer atığı (7 günlük kür) (Görgün ve Ural, 2015).

Elektrik üretmek amacıyla termik santrallerdeki kazanlarda kömürün yakılmasıyla ortaya çıkan ve bacaya takılan elektro filtrelerde biriken inorganik atık parçacıklardır (Wikipedia, 2022). Uçucu kül, çimento üretiminde hammadde olarak, kireç ile karıştırılarak enjeksiyon uygulamalarında, dolgu ve zemin iyileştirilmesi gibi inşaat mühendisliğinin birçok uygulama alanında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Uçucu kül problemlili zeminleri iyileştirmek için kullanıldığında, zeminin mukavemet değerleri ve taşıma gücünü artırıcı etki göstermektedir. Ayrıca kazı ve dolgu

maliyetlerinde ekonomik fayda sağlarken yapım hızını arttırmaktadır (Cömert, 2012; Çetin, 2011).

Totiç ve ark. (2019) yapmış olduğu çalışmada farklı oranlarda uçucu kül katkısının killi zeminlerin mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Farklı oranlarda uçucu kül kullanımıyla zemin iyileştirmede kullanılacak optimum bir uçucu kül miktarı elde etmeyi amaçlamışlardır. Bartın ili Kutlubey-Yazıcılar bölgesinden aldıkları kile ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 oranlarında F sınıfı uçucu kül katarak hazırladıkları numunelerin optimum su muhtevalarını ve kuru birim hacim ağırlıklarını bulmak için standart proktor deneyi yapmışlardır. Sonrasında hazırlanan bu numuneler optimum su muhtevasında sıkıştırılarak 1, 8, 16 ve 32 günlük kür sürelerine tabi tutulmuş ve CBR değerleri ile serbest basınç dayanımları tahkik edilmiştir. Araştırmacılar deneylerden elde edilen sonuçları incelediğinde %5, %10, %15 ve %20 oranında uçucu kül katılarak hazırlanan tüm katkılı kil numunelerinin, katkısız kil numunesine göre serbest basınç dayanımlarının ve CBR değerlerinin arttığını gözlemlemiştir. Fakat tek eksenli basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında %10 oranına kadar katılan uçucu kül katkısının dayanım değerlerini arttırırken %10 oranından sonra azalttığını tespit etmişlerdir. Tüm bu sonuçları göz önünde bulundurdıklarında killi zeminin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için optimum uçucu kül oranını %10 olarak belirlemiştir.

Ünver (2015), problemlili kil zeminlerin iyileştirilmesinde uçucu külün etkisini incelemek amacıyla deneysel çalışmalar yürütmüştür. Numuneler düşük plastisiteli Afyon kiline farklı oranlarda iki tip uçucu kül (Çatalağzı ve Soma uçucu külü) karıştırılarak hazırlanmıştır. Katkısız kil ve %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında uçucu kül katkılı kil numuneleri üzerinde standart proktor, serbest basınç, şişme ve dispersibilite deneyleri tahkik edilmiştir. Araştırmacı deney sonuçlarını incelediğinde iki tip uçucu kül katkısının artan oranlarda kile katılmasıyla hazırlanan numunelerin şişme yüzdelerinde ve şişme basıncı değerlerinde gözle görülür bir azalma olduğunu görmüştür. Bu azalmalar en iyi Soma uçucu külü katkısında ortaya çıkmıştır. Dispersif özellik gösteren Afyon kilinin dispersibilite deney sonuçları incelendiğinde, soma uçucu külünün zeminlerin dispersif davranışlarına olumlu etkisi olduğu ama Çatalağzı uçucu külünün bir etkisi olmadığı ortaya konmuştur. Serbest basınç deneyleri incelendiğinde, Soma uçucu külüyle hazırlanan numunelerin katkı

oranı arttıkça dayanımlarında da bir artış gözlemlenmiş ama aynı etki %20 oranından sonra Çatalağzı uçucu külünde istenilen seviyede gözlemlenememiştir. Sonuç olarak Soma uçucu külü Afyon kilinin geoteknik özelliklerini iyileştirmede daha etkili olmuştur. Araştırmacı bunun sebebini Soma külünün C sınıfı (yüksek kireçli) bir uçucu kül olmasına dayandırmaktadır.

Yılmaz (2020) uçucu kül ve mermer tozu atıklarını değerlendirmek amacıyla zemin stabilizasyonu ve donma-çözülme üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Doğal malzemeye %25 oranında uçucu kül ve %5, %10, %15, %20 oranlarında mermer tozu ilave edilerek çalışmaya esas olan karışımlar hazırlanmıştır. Düşük plastisiteli killi bir zemine literatür araştırmaları sonucunda ağırlıkça %25 oranında uçucu kül katılmıştır. Daha sonra bu karışıma ağırlıkça %5, %10, %15, %20 oranlarında mermer tozu katkı malzemesi ilave edilerek deney numuneleri hazırlanmıştır. Numunelerin geoteknik özelliklerini belirlemek amacıyla fiziksel deneylerin yanı sıra kompaksiyon deneyleri uygulanmıştır. Tek eksenli basınç dayanımlarını elde etmek için 7, 28 ve 84 günlük kür süreleri sonunda tek eksenli basınç deneyleri ve 28 günlük kür süresi sonrasında 12 donma-çözülme çevrimi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde sadece uçucu kül katkılı kil numunelerinin, mermer tozu ve uçucu kül katkılı kil numunelerine göre daha düşük dayanım sonuçları verdiği görülmüştür.

2.4. Fiber Katkısı ile Zemin İyileştirme

Fiberler (elyaflar veya lifler), belirli uzunluk ve incelikte eğilip bükülebilen elastisite modülleri ve mukavemet değerleri oldukça iyi olan maddelerdir. Doğal kaynaklardan elde edilebilmesinin yanı sıra istenilen özelliklerde insan eliyle de üretilebilirler. Kullanım alanları ve bileşen özellikleri yönüyle birçok fiber türü vardır ve genellikle doğal fiberler ve yapay fiberler olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir (Aral, 2006). Doğal ve yapay fiber örnekleri ve bazı fiber çeşitlerinin tipik özellikleri Tablo 2.1. ve Tablo 2.2'de gösterilmiştir (Aral, 2006; Kurt, 2006).

Tablo 2.1. Fiber çeşitleri (Aral, 2006).

| Doğal Lifler | | | Yapay Lifler |
|-------------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| Bitkisel Lifler | Hayvansal Lifler | Madensel Lifler | |
| Hindistan cevizi kabuğu | Yün | Asbest | Aramid |
| Sisal | İpek | Metal lifler | Akrilik |
| Palm | Kıl | Karbon | Kevlar |
| Jüt | - | Bazalt | Naylon |
| Keten, Kenevir | - | - | Poliüretan |
| Akwara | - | - | Polipropilen (PP) |
| Bambu | - | - | Polyester (PET) |
| Şeker kamışı posası | - | - | Polietilen (PE) |
| Ahşap (Selüloz) | - | - | Cam lifleri |

Tablo 2.2. Değişik fiber çeşitlerine ait tipik özellikler (Kurt, 2006).

| Lif Türü | Özgül ağırlık, G _s | Elastisite Modülü, E (GPa) | Çekme Dayanımı, σ _ç (MPa) | Mak. Uzama oranı, max Δl, (%) |
|--------------|----------------------------------|-------------------------------|---|----------------------------------|
| Asbest | 3.2 | 83-138 | 552-996 | 0.6 |
| Pamuk | 1.5 | 4.8 | 414-690 | 3-10 |
| Naylon | 1.1 | 4.1 | 759-828 | 16-20 |
| Polyester | 1.4 | 8.3 | 724-863 | 11-13 |
| Polietilen | 0.95 | 0.14-0.4 | 690 | 10 |
| Polipropilen | 0.9 | 3.5 | 552-759 | 25 |
| Karbon | 1.9 | 230-380 | 380-5520 | 0.5-1.6 |
| Kevlar | 1.44 | 60-130 | 3600 | 0.2-4 |
| Cam | 2.5 | 69 | 1035-3795 | 1.5-3.5 |
| Çelik | 7.8 | 200 | 276-2760 | 0.5-35 |
| Bazalt Lif | 2.8 | 89 | 4840 | 3.15 |

2.4.1. Doğal fiber katkısı

Bitki, hayvan ve mineral kaynaklarından kolay ve ekonomik şekilde elde edilen doğal lifler; yüksek özgül dayanıklılık ve elastisite modülü, düşük yoğunluk yüksek sıcaklık ve güneş ışığına karşı direnç gibi özelliklere sahiptirler. Dünyanın hemen hemen her yerinde bulunabilen yenilenebilir bir kaynaktır. Biyobozunabilir olması yönüyle çevreye zarar vermez. Aynı zamanda çok uzun yıllardan beri gevrek malzemelerin donatılmasında kullanılmaktadır. At kılının duvar harcı veya sıva yapımında kullanımı, samanın güneş ışığında pişirilmiş tuğla yapımında kullanımı buna örnek gösterilebilir. Avantajlarının yanı sıra doğal lifler, alkali ortamlara maruz kaldıklarında

durabililiteleri düşmektedir (Balabanlı ve Türker, 1992; Brandt, 2008; Kurt, 2006; Terzi, 2021). Keten, hindistan cevizi kabuğu, jüt, yün, hayvan kılı ve bambu doğal fiber çeşitlerine örnek gösterilebilir.

2.4.1.1. Keten fiber katkısı

Ilıman bölgelerde yetişen ve bilinen en eski lif türlerinden olan keten, yüksek çekme dayanımı ve elastisite modüllerine sahiptir. Bitkisel olduğu için ekonomiktir ve cam elyaf ile karşılaştırıldığında mekanik özellikleri neredeyse benzerdir (Alp, 2019; Ndepete, 2017).

Zemine karıştırılan çimento esaslı malzemelerin çekme dayanımları düşüktür. Dayanımı arttırmak için çimentolu karışımları lifli malzemelerle desteklemek yaygın olarak kullanılmaktadır (Kurt, 2006). Segetin ve ark. (2007), yapmış olduğu çalışmada çimentolu zeminin mukavemetini ve sünekliliğini geliştirmek için; Yeni Zelanda keten bitkisinden elde edilen Harakeke keten lifini kullanmıştır. Boyları 70 mm ve 85 mm olan keten lifini zemine ağırlıkça %0.6, %0.8 oranında elle ve makinalar yardımıyla olmak üzere farklı karıştırma yöntemleriyle karıştırmışlardır. Çimento-zemin karışımına artan oranlarda lif takviye edilmesiyle mukavemetinde ve sünekliliğinde önemli bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Süneklilik artışında karıştırma yöntemleri etkili bir parametre olurken fiber uzunluğu ve oranı etkili bir parametre olmamıştır. Manuel karıştırma yöntemi uygulanırken fiber oranı ve boyu arttıkça homojen bir karışım elde etmenin zorlaştığı gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak manuel karıştırma yönteminde üst sınır %0.8 fiber oranı ve 85 mm boy uzunluğu olarak belirlenmiştir. Araştırmacılar çalışma sonunda tüm verileri değerlendirdiğinde tamburlu karıştırma yöntemi kullanılarak %0.6 fiber oranında hazırlanan numunelerin daha optimum sonuçlar verdiğini ve %0.6 oranının altına düşüldüğünde numunelerin kırılğan bir davranış sergilediğini gözlemlenmişlerdir. Ayrıca üretim kolaylığı, karışımda homojenlik ve maliyette düşüş sağlamak adına %0.6 keten fiber oranının benimsenmesini tavsiye etmişlerdir.

Ayininuola ve Udoh (2018), keten fiberle stabilize edilmiş 2 farklı zeminin geoteknik özelliklerindeki değişimi incelemek amacıyla bir takım deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. İki farklı zemine 0.31 mm çapında 85 mm boyunda ve ağırlıkça %0.3, %0.6, %0.9, %1.2, %1.5 oranlarında keten fiber karıştırarak hazırladıkları numuneler

üzerinde kıvam limitleri, kompaksiyon, CBR ve serbest basınç deneyleri uygulanmışlardır. Aynı deneylerle doğal zeminin geoteknik özellikleri de belirlenmiştir. Deney sonuçları temiz kum numunesiyle karşılaştırıldığında, keten fiber oranı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerlerinde düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte serbest basınç dayanımlarında muazzam bir artış gözlemlenirken doğal zeminin CBR değeri fiber ilavesiyle %3.1'den %15'e kadar yükselmiştir. Takviyeli zeminlerin maksimum CBR ve serbest basınç dayanımı değerlerine %1.2 keten fiber oranında ulaşılmıştır.

Khelifi ve ark. (2015) keten fiberleri çimento ile stabilize edilmiş kil zemine hacimce %1, %2 ve %3 oranında karıştırarak oluşturdukları karışımın mekanik yapısındaki değişimleri incelemiştir. Çalışmada keten fiberin ilave oranına, karıştırma yöntemine, stabilize edilmiş fiberli zeminin yoğunluk, elyaf yönü, ara yüzey kalitesi, basınç ve çekme mukavemeti gibi parametrelere odaklanılmıştır. Keten fiber ilavesinin zeminin basınç dayanımı üzerinde bir etkisi olmadığı kaydedilmiştir. Bunun yanı sıra hacimce %1 oranında ilave edilmesiyle çekme dayanımında önemli bir artışa yol açtığı ve %2 oranının üzerinde eklenmesiyle dayanımlarda olumsuz bir etki oluşturduğu gözlemlenmiştir.

2.4.1.2. Hindistan cevizi fiberi katkısı

Hindistan cevizi fiberi, olgunluğa erişmemiş hindistan cevizi kabuğundaki lifli yapı suya batırılarak veya mekanik işlemlerle çıkarılarak elde edilir. İçeriğinde yüksek oranda lignin maddesi olması sayesinde diğer doğal liflere göre bozunması daha yavaş gerçekleşir ve uzun ömürlüdür. Zemin iyileştirme çalışmalarında killi zeminlere takviye edilmesiyle zeminin sıkılığını ve mukavemetini artırır. Ayrıca CBR değerlerinin de yükselmesini sağlar (Rajagopal, 2017; Rowell, 2000; Shah, 1995).

Ayininuola ve Oladotun (2016), yapmış oldukları çalışmada zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlık, kohezyon, kayma direnci açısı ve CBR (California taşıma oranı) değeri gibi mukavemet özelliklerini geliştirmek amacıyla katkı malzemesi olarak hindistan cevizi fiberi kullanmışlar. Deneyde kullanılan zemin örneklerini üç farklı bölgeden elde etmişlerdir. Üç farklı kuru zemin örneğine optimum su muhtevası oranında su eklenerek ve ağırlıkça %0.1, %0.3, %0.5, %0.7, %0.9, %1.0, %1.2 ve %1.5 oranlarında hindistan cevizi fiberi karıştırılarak hazırlanan numuneler üzerinde

üç eksenli hücre kesme deneyleri ve CBR deneyleri yapılmıştır. Araştırmacılar elde edilen verilerin tümünü incelediğinde, zemin örneklerine %1.2 oranında hindistan cevizi fiberi ilave edilmesiyle takviyeli zeminin en iyi mukavemet değerlerine ulaştığını gözlemlemişlerdir. Zemine %1.2 oranında fiber eklendiğinde danecikler arası yoğunluğun arttığını ve zeminin dış yüklere karşı direncini desteklediğini öne sürmüşlerdir.

Himanshu ve ark. (2017) araştırmaları kapsamında zayıf zeminlerin kısa vadeli stabilite sorunlarının üstesinden gelmek için hindistan cevizi fiberinin katkı malzemesi ile zemin iyileştirme uygulamalarında etkin şekilde kullanıldığı sonucuna varmışlardır. Bu bilgiden yola çıkarak çalışmalarında iyileştirme uygulamaları için gereken en uygun optimum hindistan cevizi fiberi oranını belirlemeyi amaçlamışlardır. Fiber oranının zeminin mukavemeti üzerindeki etkisini incelemek için deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. Killi zemine ağırlıkça %0.25, %0.50, %0.75 ve %1 oranında hindistan cevizi fiberleri rastgele karıştırılarak elde edilen numuneler üzerinde serbest basınç dayanımı, üç eksenli hücre kesme ve CBR deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçları aşağıdaki gibi özetlenmiştir;

- Doymun ve doymun olmayan numunelerin CBR değerleri incelendiğinde, doymun olan katkısız zeminin CBR değeri %0.75 oranında fiber katılmasıyla %2.16'dan %4.45'e yükselmiştir. Aynı lif oranında doymun olmayan zeminin CBR değeri ise %6.67'den %11.32'ye yükselmiştir.
- Serbest basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, katkısız kilin dayanımı 151.63 kN/m² olarak bulunmuştur ve karışımlardaki fiber oranı arttıkça zeminin serbest basınç dayanımları bu değer üzerinde bulunmuştur. Katkılı zemin maksimum serbest basınç dayanımına ise %0.75 fiber oranında ulaşmıştır.
- Üç eksenli hücre kesme değerleri incelendiğinde, katkılı zeminin kohezyon değeri katkısız kile göre en iyi artışı %0.75 fiber oranında göstermiş ve 19.82 kPa'dan 42.22 kPa'ya yükselmiştir. Kayma direnci açısı ise katkısız kile göre en iyi artışı %0.75 fiber oranında göstererek 16.99°'den 29.95°'ye yükseldiği görülmüştür.

Araştırmacılar deney sonuçlarından elde ettikleri verilere göre iyileştirme uygulamaları için gereken en uygun optimum hindistan cevizi fiberi oranını %0.75 olarak belirlemişlerdir.

2.4.2. Yapay fiber katkısı

Yapay fiberler, istenilen belirli özellikleri sağlayacak şekilde insan eliyle üretilen ve üretilirken esas molekül yapısını bozulmadan koruyan liflere denir. Polipropilen, polyester, polimer, naylon, aramid ve cam yapay fiber çeşitlerine örnek gösterilebilir.

2.4.2.1. Polipropilen (PP) fiber katkısı

Zemini yapay fiberlerle donatılandırmanın amacı çekme dayanımı zayıf zeminlerin dayanımını güçlendirmektir. Bu amaçla Uğur (2009), kötü ve iyi derecelendirilmiş iki farklı kum zemine poliprofilen fiberleri rastgele karıştırarak elde ettiği numunelerin mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemiştir. Deneylerde poliprofilen lifler zemine ağırlıkça %0, %0.5 ve %1 oranında katılmış, kum zeminler sıkı ve gevşek olmak üzere iki sıklıkta test edilmiş ve üç eksenli basınç deneyleri 50, 100 ve 150 kPa'lık efektif basınçlar altında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar karışlaştırıldığında numunelerdeki fiber oranı arttıkça iyi derecelendirilmiş kumların daviatr gerilmeleri de artmıştır. Kötü derecelendirilmiş kumdaki artış ise farkedilir düzeyde olmamıştır. Her iki kumun içsel srtme aırlarında fiber içeriğinin artmasıyla yaklaşık 2-3° düşmüştür. Kohezyon değerlerinde ise farklı sıklık ve fiber içeriği durumlarında pik değerler elde edilmiş ve genel olarak fiber katkısı kohezyonu olumlu yönde etkilemiştir. Araştırmacı tüm verileri göz önüne aldığında; iyi ve kötü derecelendirilmiş gevşek ve sıkı kumlara polipropilen fiber katılmasının, kumların mekanik özelliklerini önemli ölçüde değiştirdiğini ve optimum fiber oranının %0.5 olması gerektiği sonucuna varmıştır.

2.4.2.2. Polyester (PET) fiber katkısı

Bilindiği üzere geogridler ve katkı malzemeleri pratik uygulamalarda zemin iyileştirme çalışmalarında zeminlerin yük taşıma potansiyellerini arttırmak amacıyla sık sık kullanılmaktadır. Kumar ve ark. (2006) katkı malzemelerine alternatif olması yönüyle polyester fiber kullanımının uygunluğunu araştırmışlardır. alışmalarını optimum su muhtevasında sıkıştırılan yüksek plastisiteli kil zemine ağırlıkça %0.5, %1, %1.5 ve %2 oranında polyester fiber katarak elde ettiği numuneler üzerinde

serbest basma deneyleri gerçekleştirerek yürütmüşlerdir. Ayrıca çalışmalarında polyester takviyesiyle kil zemininin mukavemetindeki artışı ölçebilmek amacıyla doğal durumdaki kil numunesine kum ekleyerek karşılaştırma yapmışlar ve 3 mm, 6 mm, 12 mm uzunluğunda düz fiberler ve 6 mm uzunluğunda kıvrımlı fiberler olmak üzere iki tip fiber kullanmışlardır. Araştırmacılar deney sonuçlarını incelediğinde kum karışımlı kil numunesinin serbest basma dayanımının doğal durumdaki kil dayanımına göre yaklaşık %10'luk bir artış gösterdiği görülmüştür. Kil numunesine ağırlıkça %2 oranında 6 mm uzunluğunda düz fiber katılan karışımın, ağırlıkça %1 oranında 12 mm uzunluğunda düz fiber katılan karışımın ve ağırlıkça %1.5 oranında 6 mm uzunluğunda kıvrımlı fiber katılan karışımın dayanım değerleri incelendiğinde katkısız haldeki kil numunesinin dayanım değerine göre %100'e varan bir artış gözlemlenmiştir. Kil zemine %10 oranında kum ilave edilmesinin ardından %2 oranında 3 mm düz fiberli karışımın ve %0.5 oranında 12 mm düz fiberli karışımın dayanımında katkısız kil numunesinin dayanım değerine yaklaşık %150'lik bir artış olduğu kaydedilmiştir. Son olarak kil zemine %10 oranında kum ilaveli edilmesinin ardından %2 oranında 6 mm düz fiberli karışımın, %1.5 oranında 6 mm kıvrımlı fiberli karışımın ve %1 oranında 12 mm düz fiberli karışımın dayanımında katkısız kil numunesinin dayanım değerine göre neredeyse %180'lik bir artış gözlemlenmiştir.

3. BAZALT VE BAZALT FİBERLER

3.1. Bazalt

Yanardağların aktif hareketleri sonucu magmadan çıkan lavlar çatlaklardan sızarak yeryüzüne çıkar ve soğuyup katılarak bazaltı oluşturur. Doğada siyah ve gri renkte bulunan bazalt, aşınmaya, yüksek basınca, alkaliye ve asite karşı oldukça dayanıklı volkanik bir kayaç türüdür. Dayanıklı kimyasal yapısını büyük ölçüde SiO_2 , Al_2O_3 , demir oksitler oluşturur ve bünyesinde plagioklaz, piroksen, olivin mineralleri içermektedir. Dirençli ve sert yapısına karşın uygun işlenebilir yüzeye sahip olmasıyla birçok kullanım alanı vardır. Farklı ölçülerde öğütülebilen bazalt, inşaat ve sanayi sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Karayolu yapımında kırma taş olarak, demiryolu yapımında balast olarak, beton üretiminde agrega olarak, seramik üretiminde hammadde olarak kullanılabilir (Aydınlar Madencilik, 2022; Eskier, 2017). Şekil 3.1’de bazalt ve bazaltın öğütülmüş haline ait görseller sunulmuştur.



Şekil 3.1. Bazalt ve bazaltın öğütülmüş hali (Aydınlar Madencilik, 2022).

3.2. Bazalt Fiber

Bazalt fiber, volkanik bir kayaç türü olan bazaltın yüksek sıcaklıklarda eritilmesiyle elde edilir. ABD’de yaşayan Fransız bilim adamı Paul Dhe, bazalt kayaçlarından lif üretilmesinin mümkün olabileceği düşüncesiyle bazalt fiberin üretim tekniğini ortaya koymuştur.

1923 yılında patentini almasıyla birçok ülkede bazalt fiber üzerine çalışmalar başlatılmıştır (Saravanan, 2006).

Bazalt fiber yaygın olarak bilinen fiberlerle karşılaştırıldığında onda bir oranında daha ucuzdur ve polipropilen fiber ile karşılaştırıldığında ise çekme mukavemeti ve elastisite modülü daha yüksektir (Gao ve ark, 2015). Şekil 3.2’de uygulama alanlarına göre farklı formlarda kullanılan bazalt fibere ait görsel sunulmuştur.



(a)



(b)



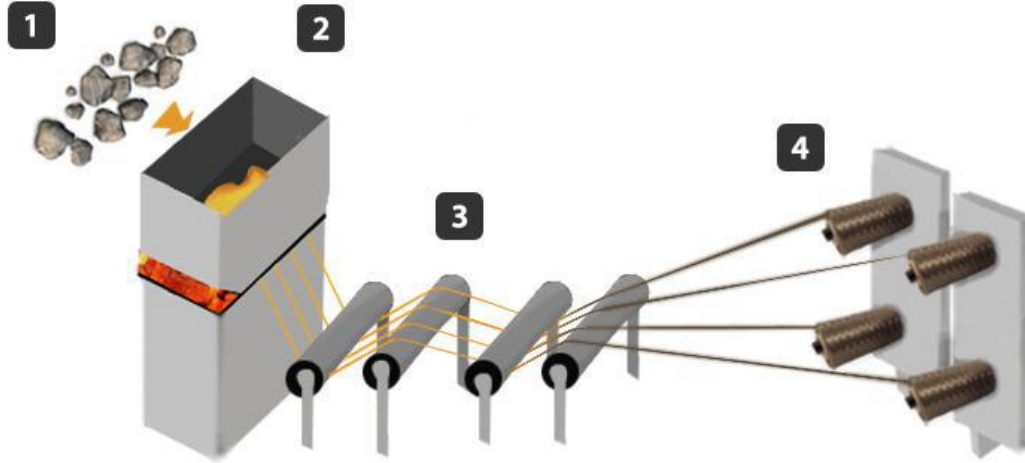
(c)

Şekil 3.2. Bazalt fiberin farklı formları (a) kırılmış bazalt fiber, (b) bazalt ip, (c) bazalt çubuklar (Çevik ve Haldenbilen, 2014; Dostkimya, 2022).

3.2.1. Bazalt fiber (elyaf veya lif) üretimi ve özellikleri

İyi bir elyaf üretebilmek için bazaltın içeriğinde iyi olması gerekir. Bazalt kayanın içinde bulunan bileşikler özellikle de SiO_2 , doğası ve kökeni itibarıyla farklılık gösterebilir. Yaklaşık %46 oranında SiO_2 içeriği bulunan bazalt kaya elyaf üretimi için uygun bir hammadde niteliğindedir (Saravanan, 2006). Bazalt fiberlerin üretim tekniği sıcaklık ve viskozite parametrelerindeki farklılıklar hariç cam fiberlerin üretim tekniği ile benzerlik göstermektedir. Ayrıca cam fiberlerin aksine hammadde olarak bazalt haricinde ilave katkı malzemelerine ihtiyaç duymaz. Yerkabuğunda bulunan en yaygın

kaya çeşidi olan bazalt, fiber üretiminde hammadde yönüyle kolay erişilebilir ve ekonomiktir. Yaklaşık 5-20 mm boyutlarında küçük parçalar halinde kırılan bazalt hava-gaz karışımı kullanılarak ısıtılır ve ardından kurutma işlemi uygulanır. Kuruyan bazalt parçaları ergitme fırınlara koyularak yaklaşık 1300°-1700°C’lerdeki yüksek sıcaklıklarda eritilir. Eriyik haldeki bazalt, platin alaşım deliklerinden geçirilerek hidrostatik basınç altında çektilir ve sonrasında soğutularak sertleştirilmiş lifler elde edilir. Sonrasında reçine ile elyaf yüzeyleri kaplanarak tüplere sarılır (Ocakbaşı, 2019; Parnas ve ark, 2007). Üretim sürecini kısaca özetlemek gerekirse; bazaltdan eriyik hazırlama, eriyiğin çektilmesi, elyaf oluşumu, reçine ile elyaf yüzeyin kaplanması ve sarma cihazıyla tüplere sarılması şeklinde sıralanabilir. Şekil 3.3’te bazalt fiberin üretim aşamalarına dair temsili bir görsel sunulmuştur.



Şekil 3.3. Bazalt fiberin temsili üretim aşamaları (Ocakbaşı, 2019).

Önceleri bazaltın homojen şekilde erimemesi ve yapısında bulunan bazı minerallerin farklı sıcaklıklarda kademeli olarak kristalleşmesi ve her aşamada hassas kontrollere gerektirmesi gibi sorunlar gündemdedi. Bu nedenle bazalt fiber sıklıkla kullanılmıyordu. Yakın zamanda sürekli eğirme teknolojisinin geliştirilmesiyle bu sorunların üstesinden gelinerek bazalt fiberin kıymeti artırılmıştır (Haeberle ve ark, 2000).

Bazaltın yoğun ve sert yapısı bazalt fiberin üstün mekanik özelliklere ve dayanıklı bir yapıya sahip olmasını sağlar. Bazalt elyafın esneklik katsayısı 78-90 GPa ve gerilme mukavemeti 1.5 GPa ve 2.9 GPa arasında değişiklik göstermektedir ve üretim

aşamasında elyafın çekme sıcaklığı arttıkça gerilme mukavemeti değerleri de artma eğiliminde olmaktadır. Bazalt fiberin özgül ağırlığı 2.65-2.8 arasında değişiklik göstermekle birlikte cam ve karbon elyaflar ile karşılaştırıldığında özgül ağırlıkları daha yüksektir. Tablo 3.1’de bazalt fiberin cam, polyamide ve karbon fiberler ile karşılaştırılması verilmiştir. Bazalt fiberler pH 13-14 değerlerine kadar olan alkali ortamlara, tuzlu ortamlara ve asitli ortamlara karşı yüksek bir dirence sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda farklı boyutlandırma ile üretilen bazalt fiberlerin nem içeriği %1 ile %2 oranında değişiklik göstermekle birlikte genelde %2’den düşüktür. Bu sayede korozyona ve mantara karşı direnç gösterebilmektedirler. Termal ve kimyasal olarak kararlı bir yapıya sahip oluşuyla iyi bir termal, elektrik ve ses yalıtımı özelliği gösterir (Ndepete, 2017; Parnas ve ark, 2007). Bazalt fiberler son yıllarda üstün mekanik özellikleri, yüksek mukavemet değerleri, uzun ömürlü ve çevre dostu olması yönüyle betonda ve zemin iyileştirme uygulamalarında takviye elemanı olarak ilgi görmektedir.

Tablo 3.1. Bazalt fiberlerin diğer fiberlerle karşılaştırılması (Kumbhar, 2014).

| Uygunluk | Bazalt fiber | E-Cam fiber | S-Cam fiber | Polyamid fiber | Karbon fiber |
|--------------------------|--------------|-------------|-------------|----------------|--------------|
| Gerilme direnci, (MPa) | 3000-4840 | 3100-3800 | 4020-4650 | 2900-3450 | 3500-6000 |
| Elastisite modulu, (GPa) | 79.3-93.1 | 72.5-75.5 | 83-86 | 70-140 | 230-600 |
| Kopmada uzama, (%) | 3.1-6 | 4.7 | 5.3 | 2.8-3.6 | 1.5-2.0 |
| Özgül ağırlık | 2.65-2.8 | 2.5-2.62 | 2.46 | 1.44 | 1.75-1.95 |
| Lif çapı, (µm) | 6-21 | 6-21 | 6-21 | - | 5-15 |
| Uygulama sıcaklığı, (°C) | (-260)-500 | (-50)-380 | (-50)-300 | (-50)-290 | (-50)-700 |
| Erime sıcaklığı, (°C) | 1450 | 1120 | 1550 | - | - |

3.3. Betonda Bazalt Fiber Katkısı

Beton gevrek bir yapı malzemesi olması sebebiyle daha sünek davranış sergilemesi için içerisine doğal veya yapay fiberler takviye edilebilmektedir. Fiberler beton içerisindeki çelik donatılara destek sağlayarak çekme ve eğilme dayanımını arttırmaktadır. Kızılkant ve ark. (2014) 400 dozlu, su/bağlayıcı oranı 0.45 olan yüksek dayanımlı betonu üretirken içerisine hacimce %0.25, %0.50, %0.75 ve %1 oranlarında bazalt fiber eklemiştir. Çalışma kapsamında katkısız ve bazalt fiber katkılı beton numunelerinin eğilme dayanımı, basınç dayanımı, yarmada çekme

dayanımı, elastisite modülü ve kırılma enerjisi parametreleri arasındaki değişimleri incelemişlerdir. Araştırmacılar sonuçlara göre, bazalt fiber oranının artmasıyla basınç dayanımlarında olumlu bir etki gözlemlerken elastisite modülünde %5 oranına yakın bir azalma tespit etmişlerdir. Bunlara ek olarak betonda bazalt fiber içeriğinin artması eğilme dayanımlarını, kırılma enerjilerini ve yarmada çekme dayanımlarını belirgin bir şekilde arttırmıştır.

Sim ve ark. (2005) yapmış oldukları çalışmada yapı elamanı olan betonun mekanik özelliklerini güçlendirmede bazalt fiberin etkisi ve uygulanabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada 2.593 gr/cm^3 yoğunluğunda $10.6 \text{ } \mu\text{m}$ çapında ve çekme dayanımı 1000 MPa olan bazalt fiber ve karşılaştırma yapabilmek için iki farklı fiber (cam ve karbon) kullanılmıştır. Bir takım deneyler ve testler ile fiberlerin çekme dayanımı, kopma anındaki uzaması, elastisite modülü ve kirişlerde eğilme performansları belirlenmiştir. Alkali çözeltiye karşı direnç testinde bazalt ve cam fiberin hacminde bir miktar azalma olurken karbon fiberde herhangi bir değişiklik tespit edilmemiştir. Belli bir süre aralığında hava koşulları arttırıldığında fiberlerin dayanımında zamanla bir azalma meydana gelmiştir. Fakat bazalt fiberin diğer fiberlere göre dayanımındaki kaybı daha yavaş gerçekleşmiştir. Ayrıca üç bazalta 2 saat boyunca 600°C 'nin üzerinde sıcaklık uygulanmış ve sadece bazalt fiber dayanımının ve hacim kütlelerinin %90'ını koruyabilmiştir. Kirişlerdeki eğilme performanslarını incelemek için tabakalar halinde uygulanan fiberlerin eğilme dayanımları karşılaştırıldığında bazalt fiber tabaka sayısına göre yaklaşık %27 oranında bir artış göstermiştir. Araştırmacılar deney sonuçlarına göre bazalt fiberin betonda iyi bir güçlendirici olabileceğini ortaya koymuşlardır.

Arslan (2017), yapmış olduğu deneysel çalışmada bazalt lifi katılarak üretilen geleneksel betonun mekanik özellikleri ve kırılma enerjisi üzerindeki değişimlerini incelemiştir. Araştırma kapsamında tüm numunelerin beton karışımında suyun çimentoya oranı (S/Ç) 0.5 ve agrega boyları 5-12 mm çapında ve akışkanlaştırıcı katkı, çimento ağırlığının %1'i oranında olacak şekilde sabit tutulmuştur. Daha sonra fibersiz ve bazalt fiber katkılı betonun kırılma enerjisini tayin etmek için üç nokta eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deney için fibersiz ve 24 mm boyunda 0.5, 1, 2 ve 3 kg/m^3 bazalt fiber içeriğine sahip betondan $50 \times 100 \times 480 \text{ mm}$ boyutlarında 15 adet çentikli kiriş numuneleri üretilmiştir. Ayrıca fiber katkılı ve katkisız betonlardan

150x300 mm boyutlarında standart silindir numuneler elde edildikten sonra 28 gün boyunca kür uygulanmıştır. Daha sonra bu numuneler üzerinde basınç deneyi gerçekleştirilerek betonun ortalama basınç dayanımları tayin edilmiştir. Deneylerden elde edilen tüm verilere göre, betondaki bazalt fiber miktarı arttıkça yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı değerleri artarak katkısız betona göre daha sünek bir davranış sergilemiştir. Lakin bu değerler 2 kg/m³'lük fiber miktarından sonra düşüşe geçmiştir. Araştırmacı katkılı betonun basınç dayanımının bir miktar arttığını, maksimum artış oranının yaklaşık %7 oranında olduğunu fakat yine de fiberin basınç dayanımı üzerinde önemli ölçüde etkisi olmadığını öne sürmüştür. Betonun kırılma enerjilerindeki değerler incelendiğinde 2 kg/m³ oranında fiberli betonun maksimum kırılma enerjisi 87.79 N/mm olarak bulunmuş ve katkısız betona göre %29 oranında bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamında bazalt fiberin betonun mekanik özelliklerini ve kırılma enerjisini önemli ölçüde arttırdığı ve optimum fiber miktarının 2 kg/m³ olduğu bulunmuştur.

Li ve Xiu (2009), bazalt fiber katkılı geopolimer beton numuneleri üzerinde 100 mm çapında parçalı Hopkinson Basma Çubuğu deneyi gerçekleştirmiştir. Bu sayede betonun dinamik yükler altında mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemiştir. Bazalt fiberli geopolimer beton üretiminde belli oranlarda uçucu kül, cüruf, kireç taşı molozu, nehir kumu, su ve bazalt fiber kullanılmıştır. Daha sonra bu beton karışımı 20°C sıcaklıkta 28 gün boyunca kür edilmiştir. Deney sonuçlarına göre bazalt fiber katkısının geopolimer betonunun dinamik basınç dayanımlarına kayda değer bir etkisi olmadığı ancak deformasyon ve enerji emme özelliklerini önemli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir.

3.4. Zemin İyileştirmede Bazalt Fiber Katkısı

Terzi (2021) Düzce ilinden elde ettiği killi zeminlere bazalt fiber katarak kayma direnci parametrelerindeki değişimleri incelemek amacıyla deneysel çalışmalar yürütmüştür. Öncelikle doğal kil numunesinin geoteknik özelliklerini belirlemek için fiziksel deneyler uygulamıştır. Sonrasında bulamaç yöntemini kullanarak doğal kil zemine ağırlıkça %0, %1, %1.5, %2 ve %2.5 oranında 6 mm, 12 mm ve 24 mm uzunluğunda bazalt fiberler ekleyerek hazırladığı numuneleri 45 kPa yük altında 7 gün boyunca konsolidasyona bırakmış ve konsolidasyonunu tamamlayan numuneler

üzerinde kesme kutusu deneyleri tahkik etmiştir. Deney sonuçlarına göre fiber oranı ve boyu arttıkça kayma direnci açılarının arttığını ve kohezyon değerlerin ise farklı bazalt oranlarında ve farklı boylarda maksimum değerlerini verdiğini gözlemlemiştir. Araştırmacı deneylerden elde ettiği veriler sonucunda bazalt fiberin zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılabileceğini ve geleneksel katkı malzemelerine bir alternatif olabileceğini öne sürmüştür.

Gobinath ve ark. (2020) zayıf özelliklere sahip bir zemin numunesine bazalt fiber ekleyerek stabilize etmeye çalıştığı takviyeli zeminin oturma ve mukavemet değerlerini deneysel çalışmalarla tahkik ederek bazalt fiberin uygunluğunu araştırmışlardır. İlk olarak katkısız zemin numuneleri üzerinde fiziksel deneyler uygulayarak zeminin geoteknik özelliklerini tayin etmişlerdir. Araştırmacılar bazalt fiber takviyeli zeminlerde bazalt oranını %2 olarak belirlemişlerdir. Katkılı ve katkısız numuneler üzerinde standart proktor deneyi uygulayarak %2 oranında bazalt fiber katkıli numunelerin optimum su muhtevsındaki maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının katkısız numuneye oranla düştüğü gözlemlenmiştir. 50x25x18 cm boyutlarında kare formundaki küçük tanka 1800 kg/m³ yoğunluğundaki bazalt fiber takviyeli zemin 45 cm derinliğinde katmanlar halinde serilmiştir. Serilen zeminin 10x10 cm boyutlarında yükleme çervesiyle uygulanan yükler altında oturma değerleri zamana bağlı olarak kaydedilmiştir. Deney sonucunda bazalt fiberin düzensiz oturmaları önlediği ve zamana bağlı olarak oturmayı doğrusal hale getirdiği görülmüştür.

Ndepete (2017) yapmış olduğu çalışmada siltli zemine ağırlıkça %0, %1, %1.5, %2 oranında ve 6 mm, 12 mm, 24 mm uzunluğundaki bazalt fiberleri karıştırarak elde ettiği numunelerin kayma direncindeki değişimleri incelemiştir. Deneysel çalışma 2 aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada doğal haldeki silt zemin 5 farklı su muhtevsında hazırlanarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan siltli zeminden silindirik numuneler elde edilerek farklı çevre basınçları altında konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyleri (UU) yapılmıştır. İkinci aşamada bazalt fiber katkıli siltli zemin numunelerine %40 oranında su ekleyerek doygun hale getirilmiş ve bir hafta boyunca farklı düşey gerilme altında konsolidasyona tabi tutulmuştur. Konsolidasyon sonucunda elde edilen silindirik numuneler üzerinde farklı çevre basınçları altında konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyleri (UU) yapılmıştır.

Bunlara ek olarak doğal zemin numuneleri ve bazalt fiber takviyeli zemin numuneleri üzerinde Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri yapılmıştır. Araştırmacı deney verilerini incelediğinde tüm numunelerin drenajsız kayma direncinin arttığını ve numunelerin doymuş olup olmamasının bu durumu etkilemediğini gözlemlemiştir. Drenajsız kayma direnci, bazalt fiberin %1.5 oranında ilavesiyle en yüksek değerine ulaşırken bu değerden sonra düşüşe geçmiştir. Ayrıca drenajsız kayma direnci bazalt fiberlerin boyu arttıkça artmış ve en iyi artışa 24 mm boyundaki bazalt fiberde ulaşmıştır.

Sungur ve ark. (2021) yapmış oldukları çalışmada, bazalt fiberle güçlendirilmiş kil zeminin kayma mukavemetindeki değişimi incelemişlerdir. Doğal kil zemin üzerinde fiziksel deneyler ve standart proktor deneyi uygulayarak zeminin geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Killi zemine, kuru ağırlığının yüzdesi olarak; 9 mm uzunlukta fiber için %0, %0.5, %0.75 ve %1.0; 15 mm uzunlukta fiber için %0, %0.5, %1.0, %1.5, %2.0 ve 22 mm uzunlukta fiber için %0, %0.5, %1.0, %1.5 oranında bazalt fiber karıştırılarak hazırlanan numuneler üzerinde kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Ayrıca bazalt fiber-kil karışımı numuneler oluşturulurken elle karıştırma yöntemi benimsenmiş ve fiberlerin daha homojen dağılabilmesi için optimum su muhtevası oranında her numuneye su eklenmiştir. Kesme kutusu deney sonuçlarına göre maksimum kayma mukavemeti ve kohezyon değerine %1.5 oranında 15 mm uzunluğundaki bazalt fiberin eklenmesiyle ulaşılmış olup en yüksek kayma açısı değerine ise %0.5 oranında 22 mm uzunluğundaki bazalt fiberin eklenmesiyle ulaşılmıştır. Araştırmacılar çalışma kapsamında zemine farklı uzunluk ve oranlarda bazalt fiber katılmasının zeminin mühendislik özelliklerini güçlendirici bir etkisi olduğunu gözlemlemiştir.

4. MALZEMELER VE YÖNTEM

Bu bölümde kullanılan malzemelerin özellikleri, numunelerin karışım oranları ve hazırlanışı hakkında bilgiler verilmiştir. Çalışmada kullanılan deney düzenekleri ve yöntemleri tanıtarak, deney sonuçları tablolar ve grafikler halinde sunulmuştur. Kum zemine bazalt fiber katkısının, fiberin boyu ve oranı değişkenlerine bağlı olarak gösterdiği etki bu çalışma kapsamında araştırılmıştır. Kum zemine ağırlıkça %0, %1, %1.5, %2, %2.5 ve boy olarak 6 mm, 12 mm, 24 mm uzunluğundaki bazalt fiberler rastgele dağıtılarak numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler sabit bir rölatif sıklık değerinde 60x60x20 mm boyutlarında kare kesitli kesme kutusuna hassasiyetle yerleştirilmiştir. Sabit rölatif sıklık değeri için önceden tartılan numuneler belirlenen kesme kutusu hacmi esas alınarak sıkıştırılmıştır. Bu aşamada fiber-kum karışımındaki homojenliğin bozulmamasına dikkat edilmiştir. Yerleştirilen numuneler üzerinde kesme kutusu deneyleri tayin edilmiştir.

4.1. Malzemeler

4.1.1. Kum zemin

Deneysel çalışmada kullanılan kum numunesi Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarı'nda bulunan numuneler arasından seçilmiştir. Deneyler için gereken miktarda kum 10 no'lu (No:10=2.00 mm) elekten elenerek içerisinde bulunan gereksiz maddeler uzaklaştırılmıştır (Şekil 4.1.). Deneylerde kullanılan kum numunesine ait fiziksel özellikler Tablo 4.1'de verilmiştir.

Türk Standardı (TS1500, 2000) Zemin Sınıflandırma Sistemi göz önüne alınarak deneylerde kullanılacak malzemenin elek analizi sonuçlarına göre zemin sınıfı üniform kum (SP) olarak tayin edilmiştir.



Şekil 4.1. Kum zemin numunesi.

Tablo 4.1. Deneyselerde kullanılan kum zeminine ait parametreler.

| Kum Zemin | |
|---|-------|
| Özellik | Değer |
| Dane birim hacim ağırlığı, G _s | 2.69 |
| Maksimum boşluk oranı, e _{mak} | 1.18 |
| Minimum boşluk oranı, e _{min} | 0.63 |
| Efektif dane çapı, D ₁₀ (mm) | 0.08 |
| D ₃₀ (mm) | 0.109 |
| D ₅₀ (mm) | 0.147 |
| D ₆₀ (mm) | 0.17 |
| Üniformluk katsayısı, C _u | 2.13 |
| Süreklilik katsayısı, C _r | 0.87 |
| Rölatif sıkılık, D _r (%) | 44 |
| c (kPa) | 23 |
| φ (°) | 34 |
| TS 1500, 2000 'e göre zemin sınıfı | SP |

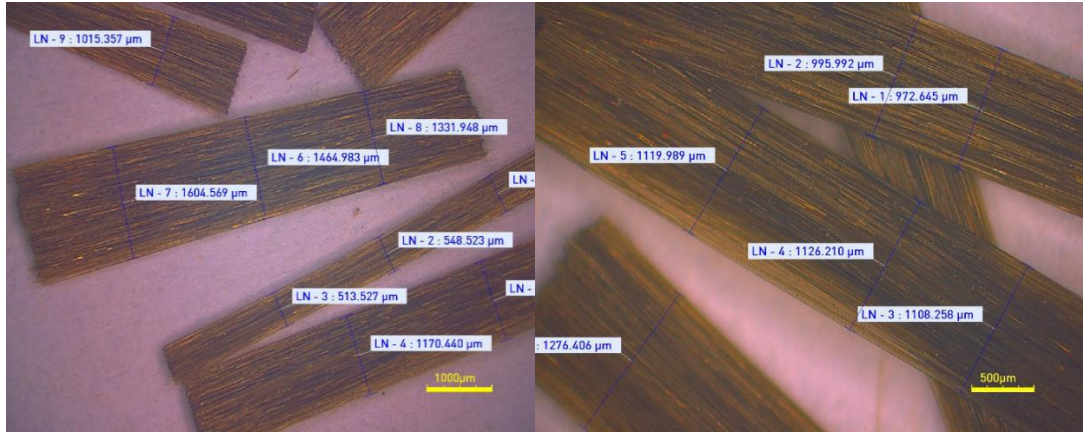
4.1.2. Bazalt fiber

Deneysel çalışmalar kapsamında bazalt fiberler Spinteks Tekstil İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş (Türkiye)'den temin edilmiştir. 6 mm, 12 mm ve 24 mm uzunluğundaki bazalt fibere ait farklı görüntüler ve mikroskopik görünüm Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Tablo 4.2'de bazalt fibere ait fiziksel ve mekanik özellikler sunulmaktadır.



(a)

(b)



(c)

(d)

Şekil 4.2. Farklı boylarda bazalt fiberler (a) birbirinden ayrılmış bazalt fiberler (b), bazalt fiberlerin mikroskopik görünümleri (c,d) (Ocakbaşı, 2019).

Tablo 4.2. Bazalt fiberin fiziksel ve mekanik özellikleri (Ocakbaşı, 2019).

| Bazalt Fiber | | |
|-----------------------|----------------|-------------------|
| Özellik | Değer | Birim |
| Özgül Ağırlık | 2.60 - 2.65 | kN/m ³ |
| Elastisite Modülü | 70 - 90 | GPa |
| Çekme Dayanımı | 2800 - 3000 | MPa |
| Kopma Uzaması | 3.1 - 6 | % |
| Çapı | 6 - 25 | µm |
| Uygulamanın Sıcaklığı | (-250) - (550) | °C |
| Erime Noktası | 1350 | °C |

4.2. Yöntem

Deneysel çalışmada TS 1500/2000 standardı baz alınarak zeminin sınıfını belirlemek amacıyla elek analizi deneyi yapılmıştır. Zeminin özgül ağırlığını belirlemek için piknometre deneyi yapılmıştır. Son olarak zeminin sıkılığını, maksimum boşluk oranı ve minimum boşluk oranını belirlemek amacı ile rölatif sıkılık deneyi yapılmıştır.

Deneyisel çalışmada kullanılan 6 mm, 12 mm ve 24 mm uzunluğundaki bazalt fiberler, kum zemine ağırlıkça %1, %1.5, %2 ve %2.5 oranında ilave edilmiştir. Bazalt fiberler karışıma eklenmeden önce lifli yapının birbirinden ayrışmasını sağlamak için basınçlı hava verilmiştir. Oldukça homojen bir kum-bazalt fiber karışımı elde etmek için özen gösterilmiştir. Fiberler kuma kademeli şekilde (genelde 3 kademe şeklinde) arttırılarak eklenmiş olup makul düzeyde tek düze bir dağılım elde edene kadar karıştırılmıştır. Fiber içeriği ve boyu arttıkça liflerin kuma homojen bir şekilde karışmasının zorlaştığı kaydedilmiştir. Bazalt fiber-kum karışımları kabul edilebilir düzeyde homojenliğe ulaştığında 50, 100 ve 150 kPa'lık normal gerilme (σ_n) altında kesme kutusu deneylerine tabi tutulmuşlardır. Şekil 4.3'te doğal durumdaki kum numunesi ve bazalt fiber karıştırılmış kum numunesine ait görseller sunulmuştur. Tablo 4.3'te deneysel çalışmalar için hazırlanan bazalt fiber-kum karışımı numunelerine ait kumun ağırlığı ve bazalt fiberin ağırlığı, uzunluğu ve oranı verilmiştir.



Şekil 4.3. Doğal durumdaki kum numunesi ve bazalt fiber karıştırılmış kum numunesi.

Tablo 4.3. Hazırlanan karışımlarda kum ve fiber ağırlığı, fiber boyu ve oranları.

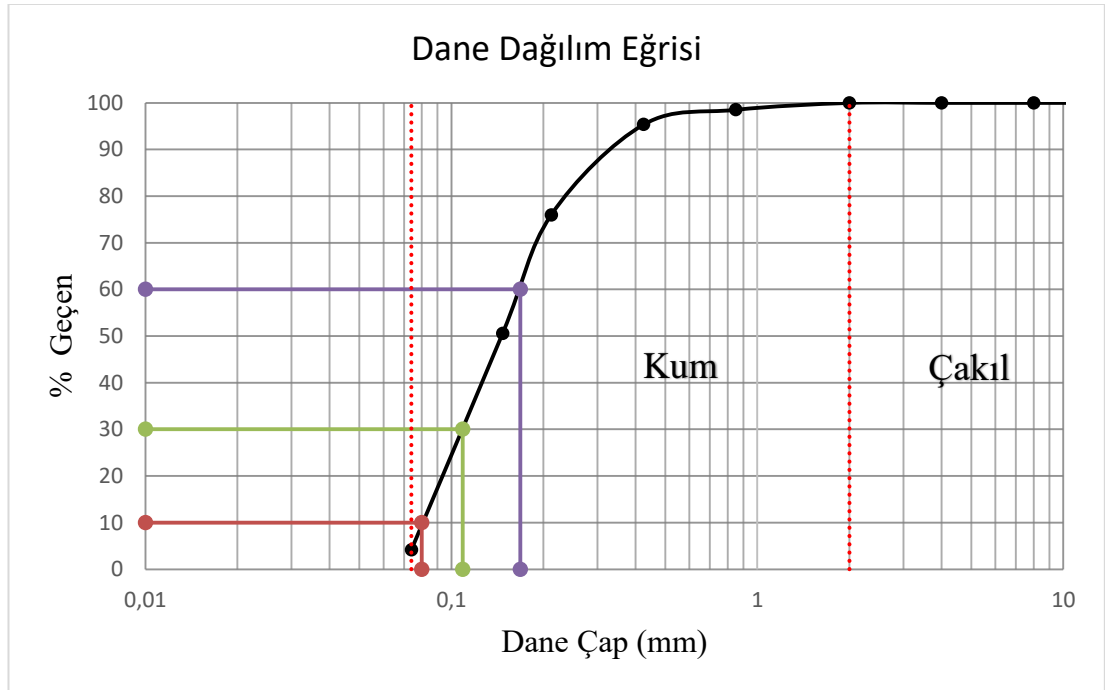
| Karışım No | Numune Tanımı | Kum Ağırlığı (gr) | Fiber Ağırlığı (gr) | Fiber Uzunluğu (mm) | Fiber Oranı (%) |
|------------|------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-----------------|
| 1 | Doğal Zemin (kum) | 100 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | %1 fiber katkılı kum | 100 | 1 | 6 | 1 |
| 3 | %1.5 fiber katkılı kum | 100 | 1.5 | 6 | 1.5 |
| 4 | %2 fiber katkılı kum | 100 | 2 | 6 | 2 |
| 5 | %2.5 fiber katkılı kum | 100 | 2.5 | 6 | 2.5 |
| 6 | %1 fiber katkılı kum | 100 | 1 | 12 | 1 |
| 7 | %1.5 fiber katkılı kum | 100 | 1.5 | 12 | 1.5 |
| 8 | %2 fiber katkılı kum | 100 | 2 | 12 | 2 |
| 9 | %2.5 fiber katkılı kum | 100 | 2.5 | 12 | 2.5 |
| 10 | %1 fiber katkılı kum | 100 | 1 | 24 | 1 |
| 11 | %1.5 fiber katkılı kum | 100 | 1.5 | 24 | 1.5 |
| 12 | %2 fiber katkılı kum | 100 | 2 | 24 | 2 |
| 13 | %2.5 fiber katkılı kum | 100 | 2.5 | 24 | 2.5 |

4.2.1. Fiziksel deneyler

Bu çalışma kapsamında fiziksel deneyler doğal numuneler üzerinde uygulanmıştır. TS 1500/2000 standardı baz alınarak zeminin sınıfını belirlemek amacıyla elek analizi deneyi yapılmıştır. Zeminin özgül ağırlığını belirlemek için piknometre deneyi yapılmıştır. Son olarak zeminin sıklığını, maksimum boşluk oranı ve minimum boşluk oranını belirlemek amacı ile rölatif sıklık deneyi yapılmıştır.

4.2.1.1. Elek analizi

Deneysel çalışmada, Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarı'ndan seçilen kum zemin numuneleri kullanılmıştır. Bir miktar kum numunesi ASTM standartlarına uygun bir dizi elekten elenerek dane çapı dağılım eğrisi çizilerek zemin sınıfı belirlenmiştir. Çizilen bu grafik üzerinde D_{10} , D_{30} , D_{50} ve D_{60} değerleri gösterilmiştir (Şekil 4.4.).



Şekil 4.4. Kum zemin numunesine ait dane dağılım eğrisi ve efektif çaplar.

Grafik üzerinden $D_{10}=0.08$, $D_{30}=0.109$, $D_{50}=0.147$ ve $D_{60}=0.17$ olarak bulunmuştur. Bu değerler kullanılarak C_u ve C_r değerleri aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmıştır;

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (4.1)$$

$$C_r = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad (4.2)$$

Burada C_u zeminin üniformluk katsayısını ve C_r zeminin süreklilik katsayısını ifade etmektedir. Deney sonucunda $C_u=2.13$ ve $C_r=0.87$ olarak bulunmuştur. Ayrıca deney sonucunda çakıl oranı %0, kum oranı %95.84 ve ince malzeme oranı ise %4.2 olarak belirlenmiştir. Hesaplamaların tamamlanmasının ardından Türk Standardı (TS1500, 2000) Zemin Sınıflandırma Sistemi göz önüne alınarak deneylerde kullanılan malzemenin zemin sınıfı üniform kum (SP) olarak tayin edilmiştir. Şekil 4.5’de elek analizine ait görseller verilmiştir.



Şekil 4.5. Elek analizine ait fotoğraflar.

4.2.1.2. Piknometre deneyi

Bu çalışmada ASTM D854’e göre deneylerde kullanılan kumun özgül ağırlığını belirlemek amacıyla piknometre deneyi yapılmıştır. Deneyde 50 ml hacimli piknometre şişeleri ve 50 gr kuru kum numunesi kullanılmıştır. Piknometre şişeleri yıkanarak 105°C etüvde kurutulmuştur. Daha sonra piknometre boş şekilde, içerisinde su ve su + numune varken tartılarak ağırlıkları kaydedilmiştir. Ölçümler yapılırken özellikle içerisinde hava kalmamasına özen gösterilmiştir. Bu nedenle numuneler desikatöre yerleştirilmiş ve içerisindeki hava vakumlanmıştır. Bu deneyler üç defa tekrarlanarak elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır. Deney sonunda kum numunesinin özgül ağırlığı 2.69 gr/cm^3 olarak bulunmuştur. Şekil 4.6’da piknometre deneylerine ait görseller verilmiştir.



Şekil 4.6. Piknometre deneyine ait fotoğraflar.

4.2.1.3. Rölatif sıklık deneyi

Bu çalışmada, deneylerde kullanılan kum zeminin sıklığını bulmak için rölatif sıklık deneyi yapılmıştır. Deney kapsamında ASTM D4253-16 ve D4254-16 standartları göz önüne alınarak maksimum ve minimum boşluk oranları bulunmuştur. Gevşek ve sıkı halde olmak üzere iki farklı durumda uygulanan rölatif sıklık deneyinde silindir şeklinde metal kalıp, titreşim tablası ve sürşarj yükü için ağırlıklar kullanılmıştır.

Kumun gevşek durumunu sağlamak için kum örnekleri huni yardımıyla olabildiğince düşük bir yükseklikten silindir metal kalıbın tamamını dolduracak şekilde yavaşça ve sarsmadan dökülmüştür. Metal kalıba dökülen numunenin yüzeyi düzlendikten sonra kap + numune ağırlığı not edilmiştir ve kalıp hacmi de dikkate alınarak numunenin maksimum boşluk oranı (e_{max}) bulunmuştur.

Kumun sıkı durumunu sağlamak için kum örnekleri aynı gevşek durumdaki gibi silindir metal kalıba dökülerek yüzeyi düzlenmiştir. Hazırlanan mekanizma hassasiyetle titreşim tablası üzerine alınmıştır. Daha sonra silindir metal kalıbın üzerine klavuz gömlek takılarak sürşarj yükü ağırlıkları yerleştirilmiştir. Titreşim tablası frekansı 60 khz ayarlanarak kum numunesi 10 dk boyunca sabit yük altında sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işleminden sonra klavuz gömlek çıkarılarak silindir kalıbın içinde 3 farklı noktadan kumpas yardımıyla ölçüm yapılmıştır. Sıkıştırılmış numunenin hacmindeki azalma hesaplanarak kumun sıkı durumdaki minimum boşluk oranı (e_{min}) bulunmuştur.

Elde edilen veriler sayesinde kumun rölâtif sıklık oranı aşağıdaki denklem 4.3 kullanılarak $D_r = 44$ olarak hesaplanmıştır.

$$D_r(\%) = \frac{e_{mak} - e}{e_{mak} - e_{min}} \quad (4.3)$$

Burada D_r rölâtif sıklığı, e_{mak} numunenin gevşek haldeki maksimum boşluk oranını, e_{min} numunenin sıkı haldeki minimum boşluk oranını ve e ise istenilen rölâtif sıklıktaki boşluk oranını ifade etmektedir. Şekil 4.7’de rölâtif sıklık deneyine ait görseller verilmiştir.



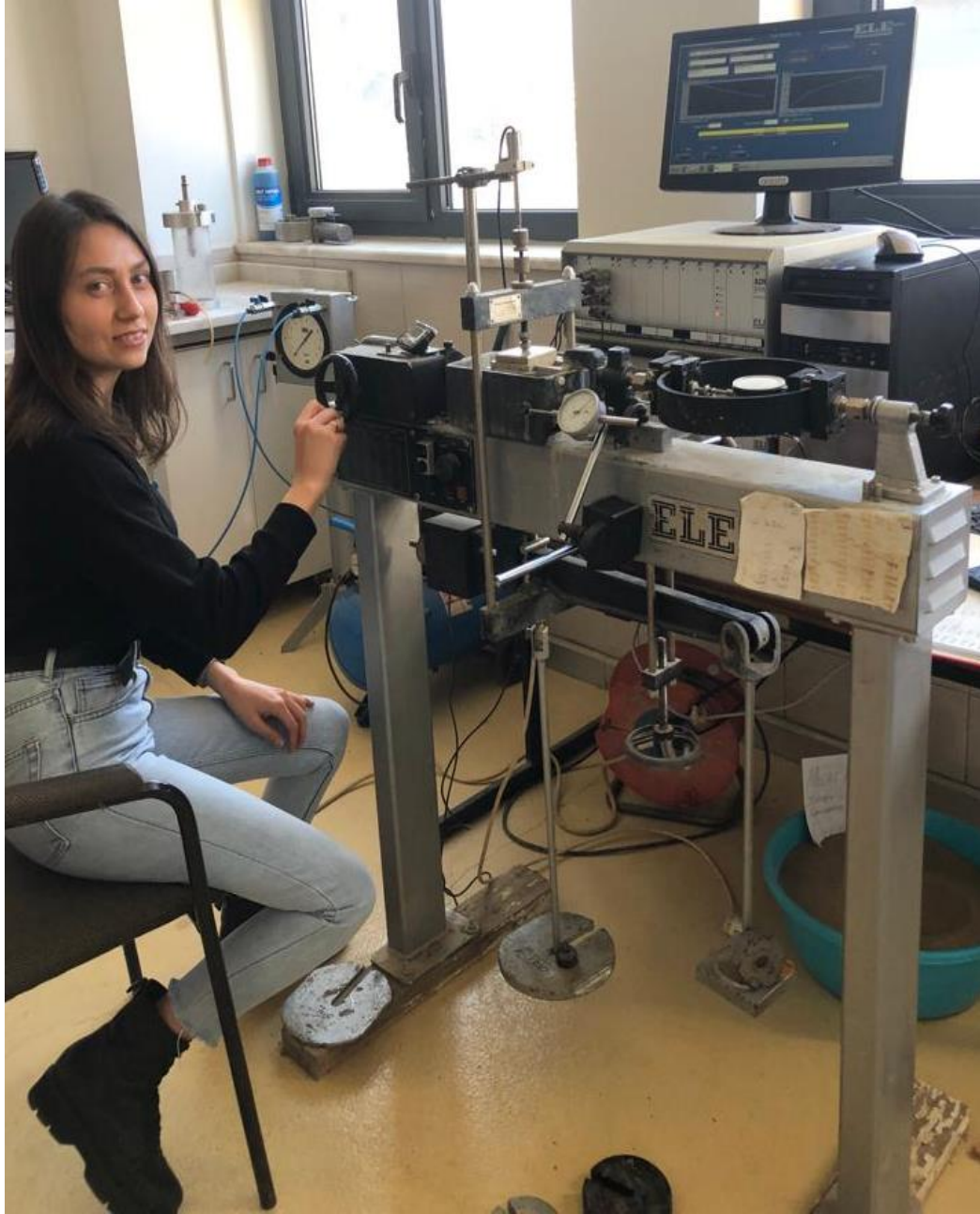
Şekil 4.7. Rölâtif sıklık deneyine ait fotoğraflar.

4.3. Kesme Kutusu Deneyleri

Kesme kutusu deneyleri zeminlerin kayma direnci parametrelerini belirlemede kullanılan en eski ve hızlı yöntemlerdendir. Deneyin yapılış prensibinde dikdörtgen veya dairesel kesitli ve iki parçadan oluşan bir kutu içerisine zemin numunesi yerleştirilir. Bu kutulardan üstte kalan parça sabit tutularak altta kalan parça sabit bir hızda ve belli bir yatay kuvvet uygulanarak hareket ettirilir. Bu sırada kutu içerisindeki numune üzerine belirli bir normal gerilme kuvveti uygulanarak önceden belirlenmiş yatay bir düzlem boyunca kırılmaya zorlanır.

Bu çalışma kapsamında bazalt fiberin kumlu zeminlerin kayma direnci parametrelerine etkisini belirlemek amacıyla; bazalt fiber katkılı ve katkısız kum numuneleri üzerinde toplamda 39 adet kesme kutusu deneyi gerçekleştirilmiştir. Doğal kum zeminine ağırlıkça %0, %1, %1.5, %2, %2.5 oranında ve boy olarak 6 mm, 12 mm, 24 mm uzunluğundaki bazalt fiberler katılarak numuneler hazırlanmıştır.

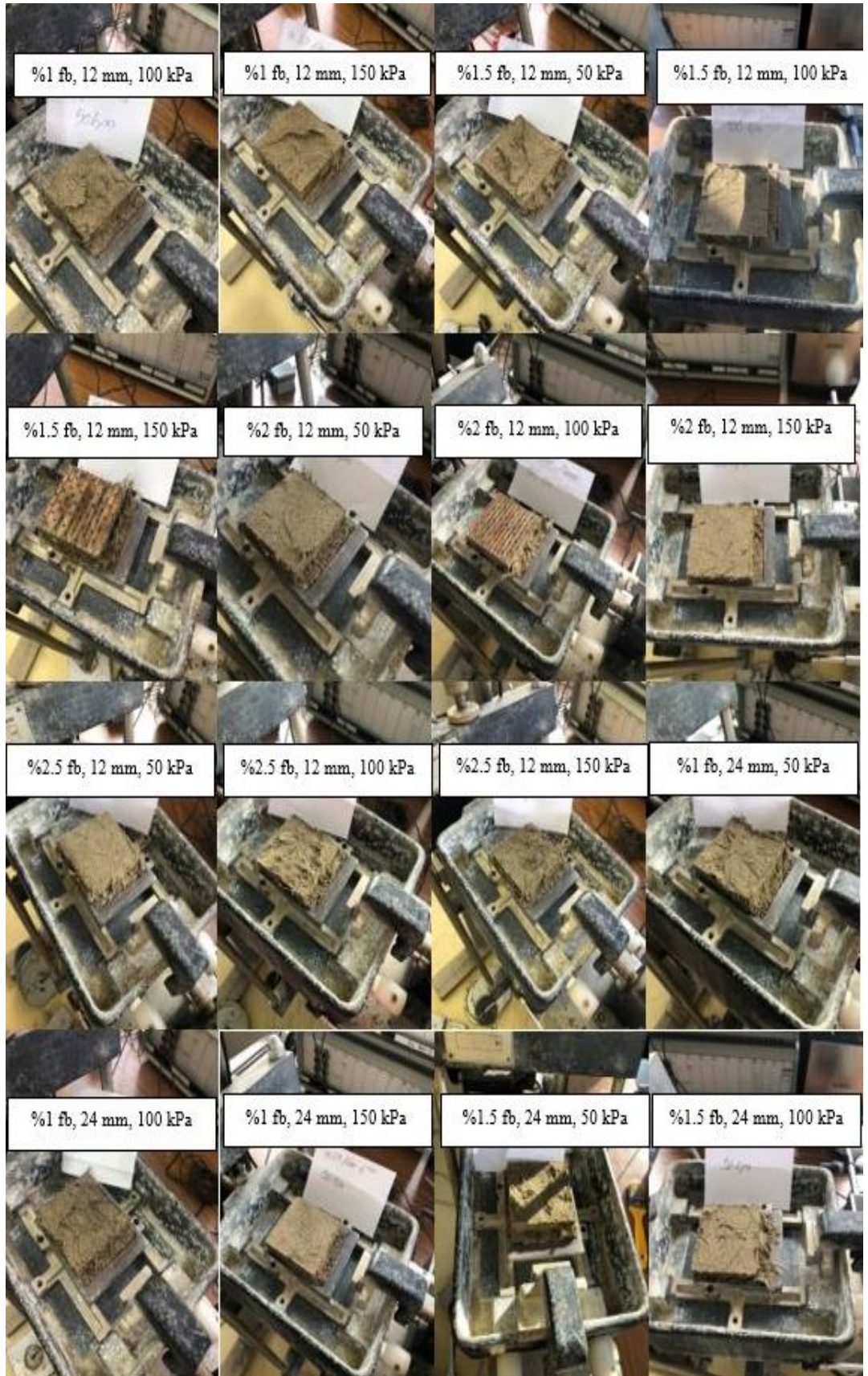
Hazırlanan numuneler sabit rölatif sıkılık değerinde olacak şekilde 60x60x20 mm boyutlarında kare kesitli bir kesme kutusuna hassasiyetle yerleştirilmiştir. Numune kutuya koyulmadan önce ve sonra numunenin altına ve üstüne gözenekli plakalar koyularak yükleme başlığı yerleştirilmiştir. Deneyler 50, 100 ve 150 kPa normal gerilmeler altında yükleme hızı 0.5 mm/dk olacak şekilde kesme kuvvetine maruz bırakılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.8’de deneylerde kullanılan kesme kutusu cihazı ve Şekil 4.9’da ise kesme kutusu deneyine tabi tutulmuş 39 adet numuneye ait görseller yer almaktadır.



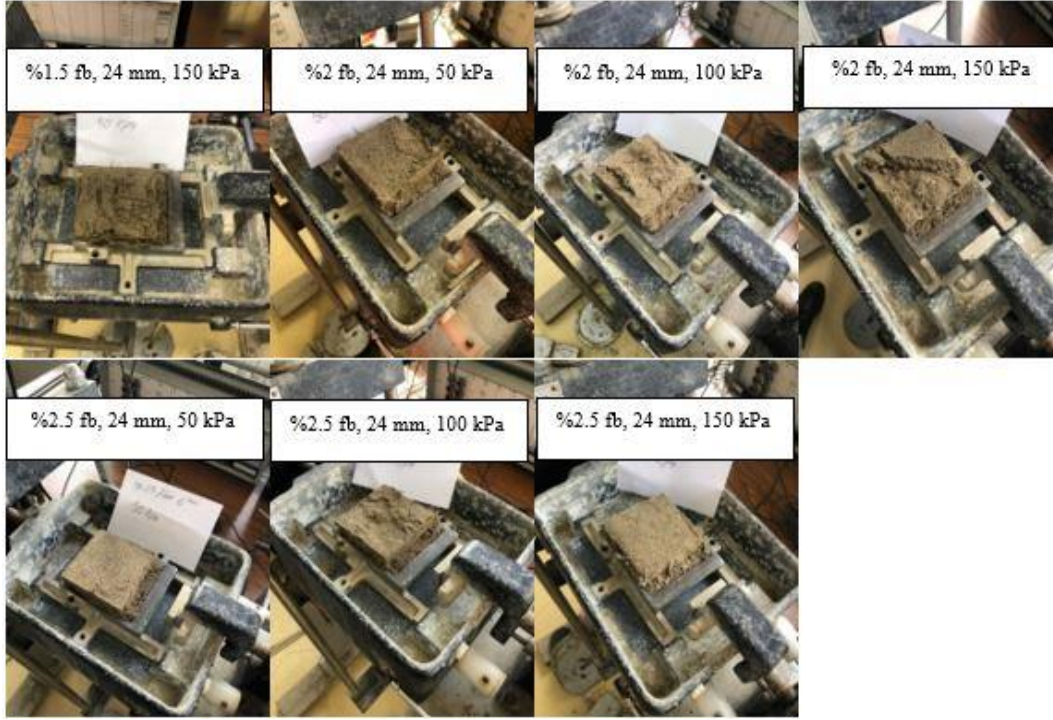
Şekil 4.8. Deneylerde kullanılan kesme kutusu cihazı.



Şekil 4.9. Kesme kutusu deneyine tabi tutulmuş numunelerin tümü.



Şekil 4.9. (Devamı) Kesme kutusu deneyine tabi tutulmuş numunelerin tümü.

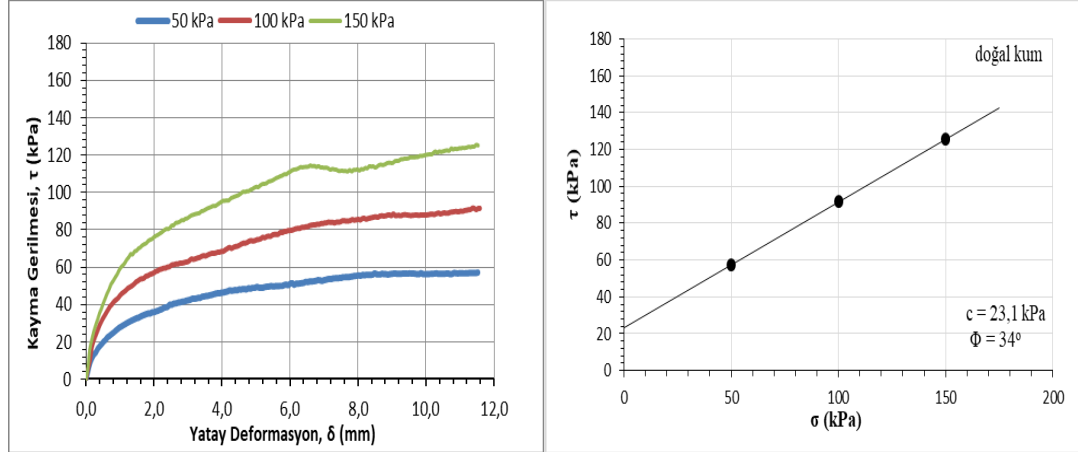


Şekil 4.9. (Devamı) Kesme kutusu deneyine tabi tutulmuş numunelerin tümü.

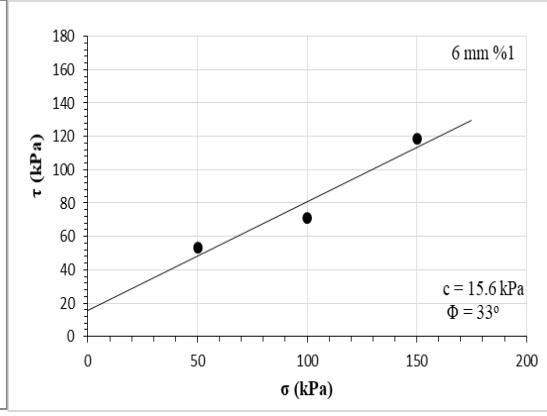
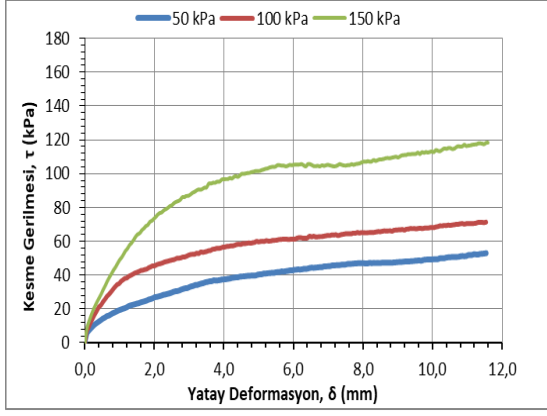
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

5.1. Kesme Kutusu Deneyinden Elde Edilen Sonuçlar

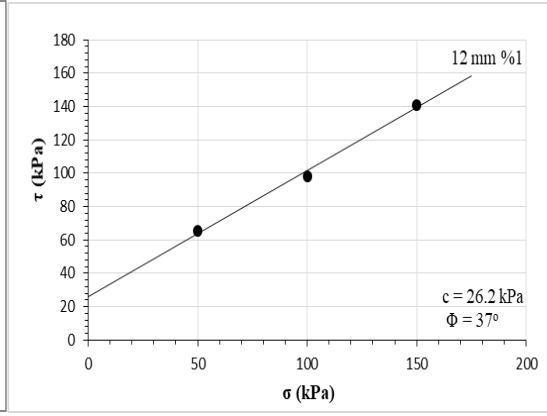
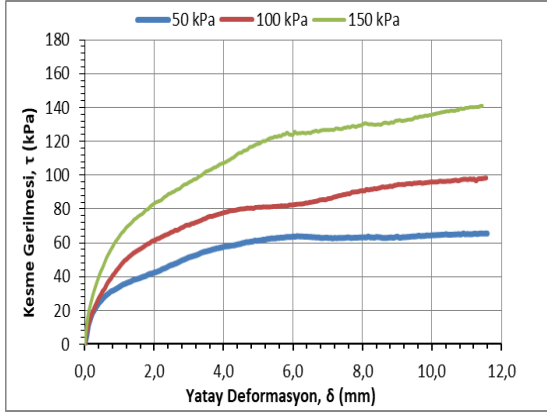
Bu araştırma kapsamında 3 tanesi doğal kum zemin ve 36 tanesi fiber-kum karışımı numuneler olmak üzere toplamda 39 adet kesme kutusu deneyi tayin edilmiştir. Şekil 5.1’de katkısız doğal kumun kesme kutusu sonuçları verilmiştir. Sonuçlar ele alınarak kayma direnci açısı (ϕ) 34° ve kohezyon değeri (c) 23.1 kPa olarak bulunmuştur. Şekil 5.2., Şekil 5.3., Şekil 5.4. ve Şekil 5.5’te ise bazalt fiber katkılı bütün numunelerin yatay deformasyon-kayma gerilmesi grafikleri ve normal gerilme-kayma gerilmesi grafikleri verilmiştir. Normal gerilme-kayma gerilmesi grafiklerinden elde edilen sonuçlarla kayma direnci açıları ve kohezyon değerleri sunulmuştur. Tablo 5.1’de ise 39 adet kesme kutusu deneyinden elde edilen kayma direnci parametrelerinin özet tablosu verilmiştir.



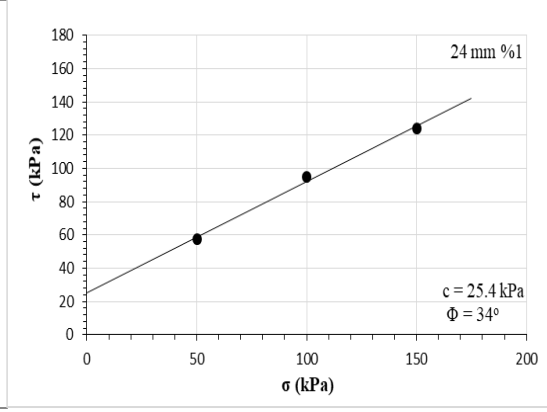
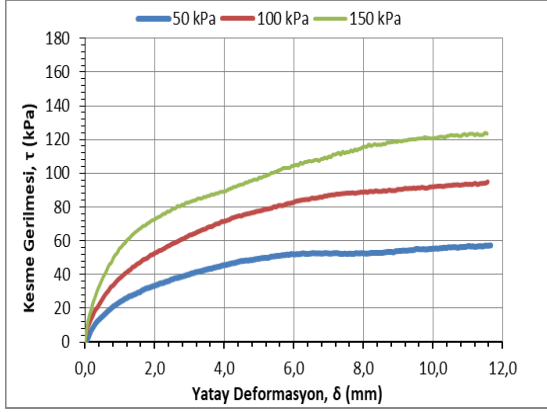
Şekil 5.1. Doğal kum numunesi.



(a)

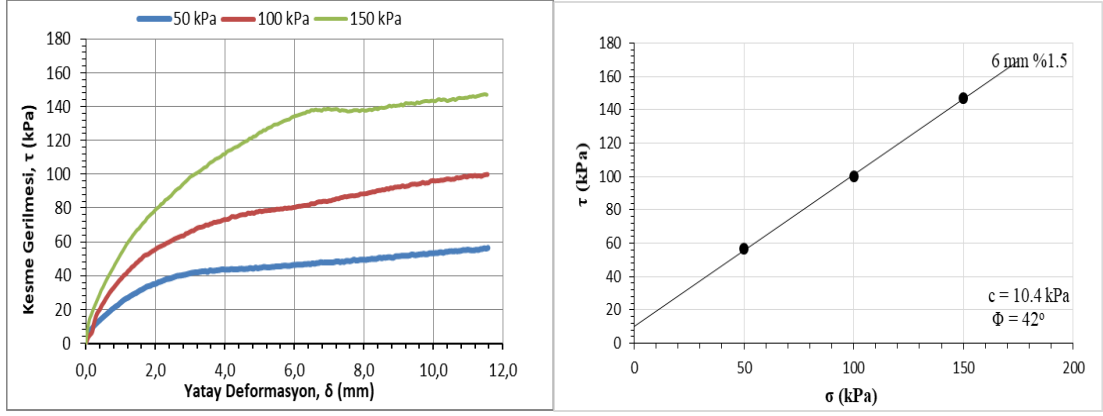


(b)

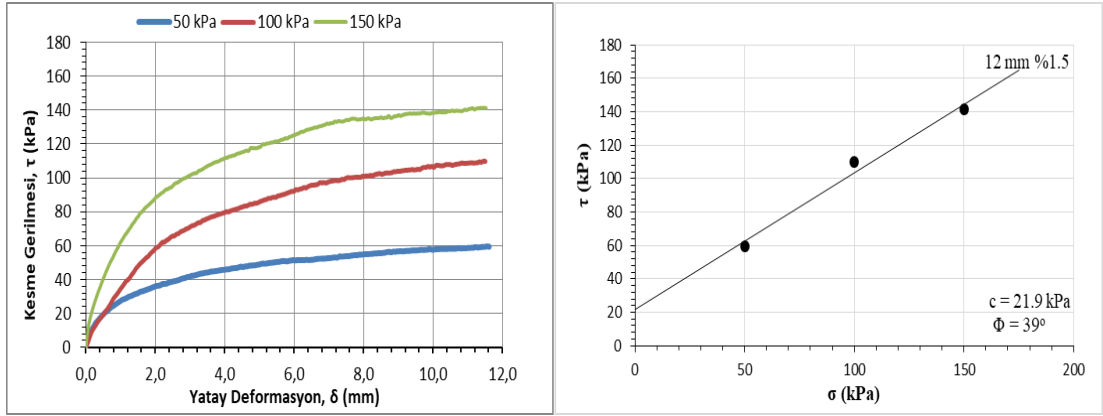


(c)

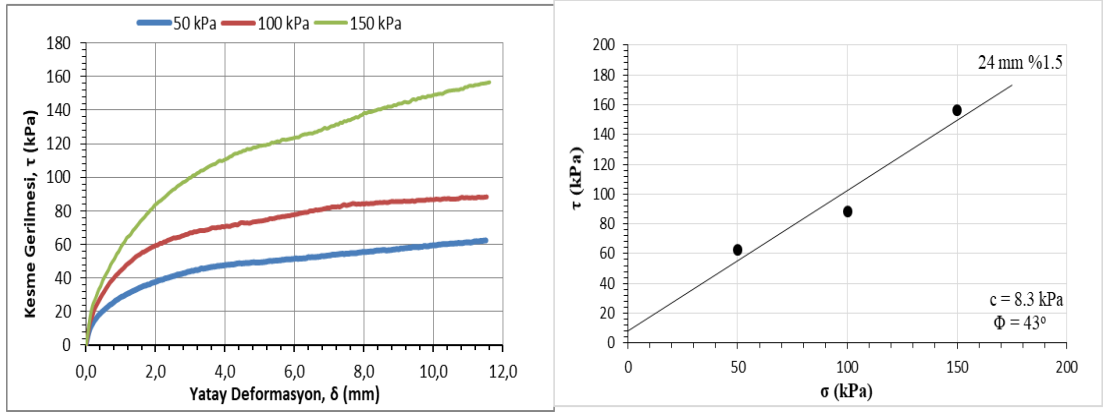
Şekil 5.2. %1 fiber oranı (a) 6 mm, (b) 12 mm, (c) 24 mm.



(a)

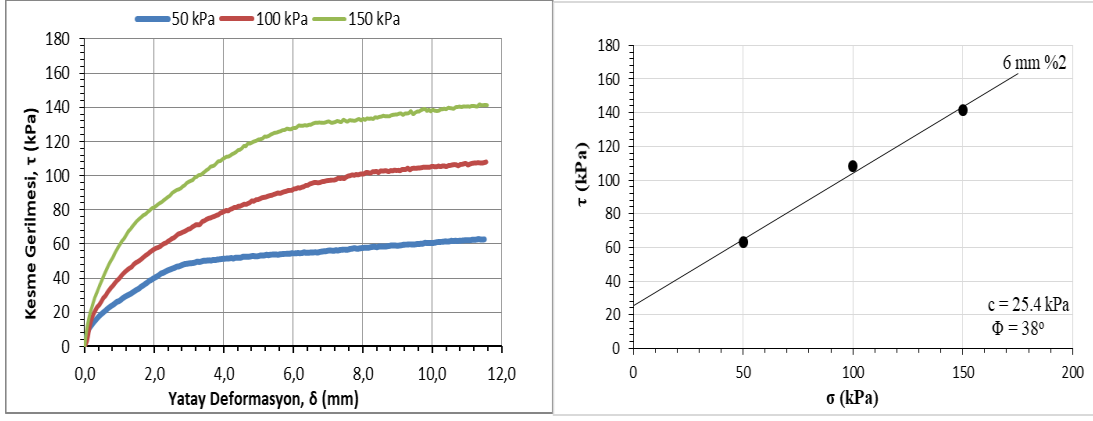


(b)

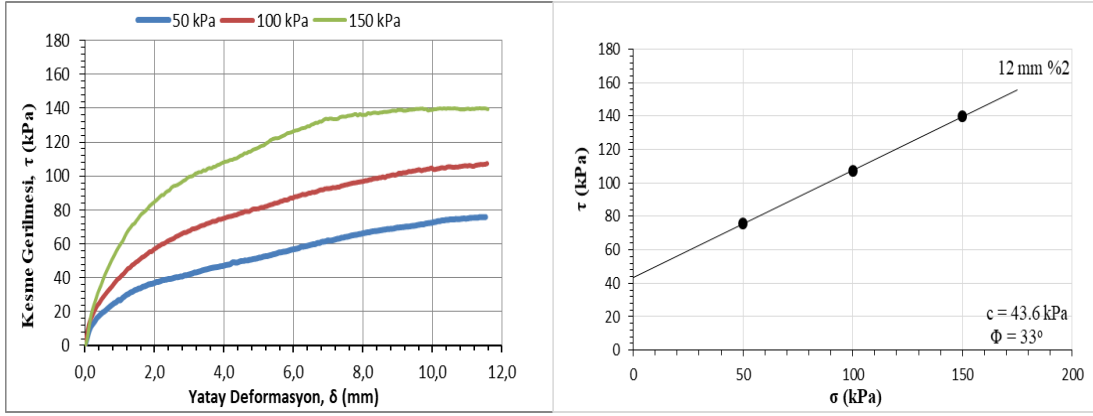


(c)

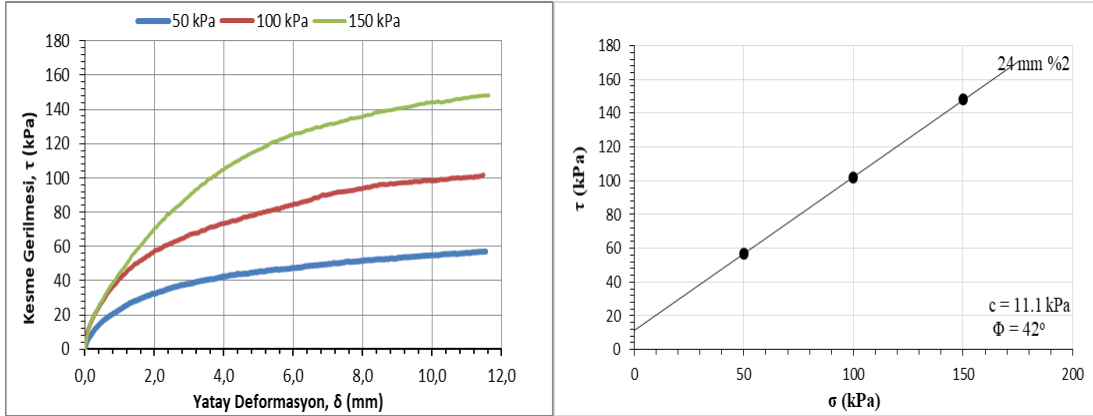
Şekil 5.3. %1.5 fiber oranı (a) 6 mm, (b) 12 mm, (c) 24 mm.



(a)

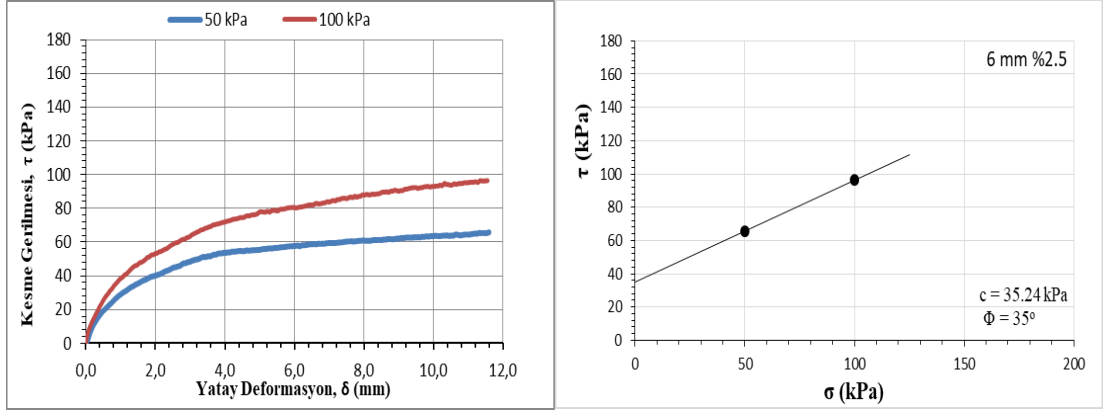


(b)

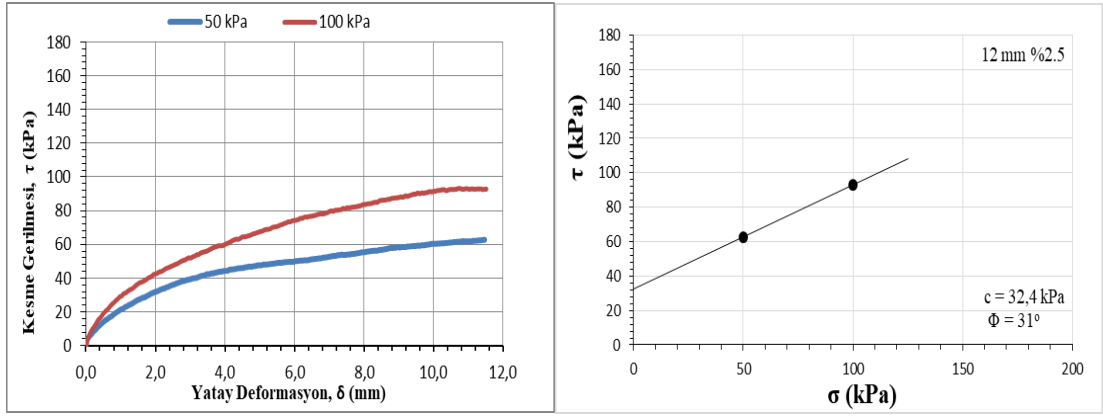


(c)

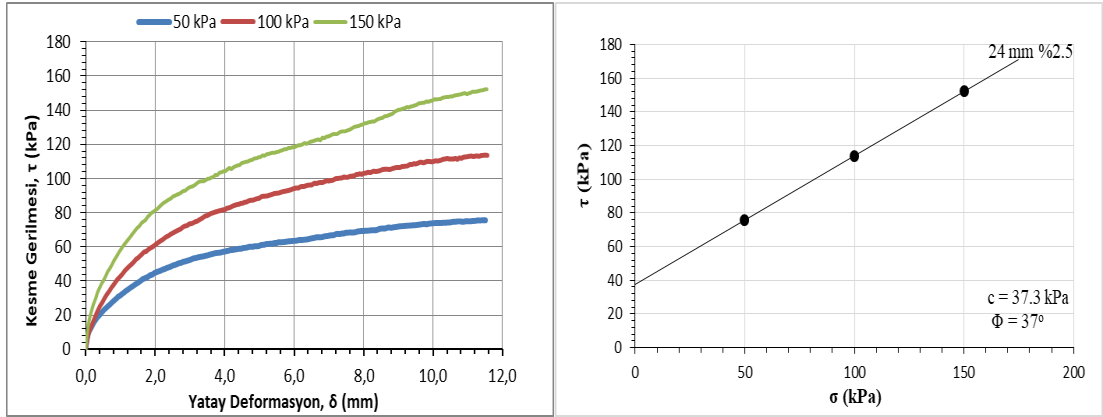
Şekil 5.4. %2 fiber oranı (a) 6 mm, (b) 12 mm, (c) 24 mm.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.5. %2,5 fiber oranı (a) 6 mm, (b) 12 mm, (c) 24 mm.

Tablo 5.1. Kayma direnci parametrelerine ait değerler.

| Fiber boyu (mm) | Fiber oranı (%) | ϕ | r_ϕ (%) | c | r_c (%) | 50 kPa | | 100 kPa | | 150 kPa | |
|-----------------|-----------------|--------|--------------|-------|-----------|---------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|---------------------|
| | | | | | | τ_{maks} | Γ_{maks} (%) | τ_{maks} | Γ_{maks} (%) | τ_{maks} | Γ_{maks} (%) |
| 0 | 0 | 34 | 0.0 | 23.1 | 0,00 | 57.13 | 0.00 | 91.61 | 0.00 | 125.44 | 0.00 |
| 6 | 1 | 33 | -2.9 | 15.6 | -32.47 | 53.02 | -7.21 | 71.34 | -22.13 | 118.31 | -5.69 |
| 6 | 1.5 | 42 | 23.5 | 10.4 | -54.98 | 56.47 | -1.17 | 99.89 | 9.03 | 147.31 | 17.43 |
| 6 | 2 | 38 | 11.8 | 25.4 | 9.96 | 62.91 | 10.12 | 108.03 | 17.92 | 141.79 | 13.03 |
| 6 | 2.5 | 35 | 2.9 | 35.4 | 53.25 | 65.85 | 15.26 | 96.46 | 5.28 | 153.75 | 22.56 |
| 12 | 1 | 37 | 8.8 | 26.2 | 13.42 | 65.61 | 14.83 | 98.34 | 7.35 | 141.08 | 12.46 |
| 12 | 1.5 | 39 | 14.7 | 21.9 | -5.19 | 59.61 | 4.34 | 109.89 | 19.95 | 141.34 | 12.67 |
| 12 | 2 | 33 | -2.9 | 43.6 | 88.74 | 75.85 | 32.75 | 107.36 | 17.19 | 140.02 | 11.62 |
| 12 | 2.5 | 31 | -8.8 | 32.40 | 40.26 | 62.81 | 9.93 | 93.23 | 1.76 | 157.58 | 25.62 |
| 24 | 1 | 34 | 0.0 | 25.4 | 9.96 | 57.29 | 0.28 | 94.95 | 3.64 | 124.00 | -1.15 |
| 24 | 1.5 | 43 | 26.5 | 8.3 | -64.07 | 62.43 | 9.27 | 88.33 | -3.58 | 156.59 | 24.83 |
| 24 | 2 | 42 | 23.5 | 11.1 | -51.95 | 57.02 | -0.20 | 101.76 | 11.08 | 148.30 | 18.22 |
| 24 | 2.5 | 37 | 8.8 | 37.3 | 61.47 | 75.63 | 32.38 | 113.76 | 24.18 | 152.23 | 21.35 |

Tablo 5.1’de farklı fiber boyları ve oranlarında karıştırılan kum numunelerinin ϕ açısı ve kohezyon değerindeki değişim oranı yüzde olarak aşağıda bulunan formül ile hesaplanmıştır (Denklem 5.1). Burada değişim oranı yüzdesi r;

$$r = \frac{\text{bazalt fiber katkılı ilgili parametre}}{\text{parametrenin orijinal değeri}} \times 100 \quad (5.1)$$

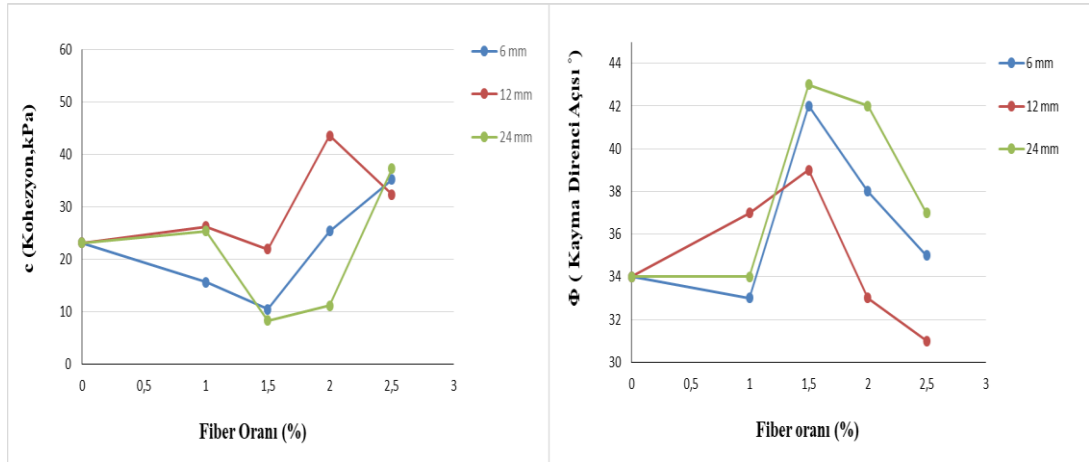
formulasyonu ile hesaplanmıştır. Bu formulasyona göre; ϕ açısının değişim oranı incelendiğinde en yüksek artış %1.5 katkılı 24 mm boyundaki bazalt fiber karışımı numunede gözlemlenmiş olup, ϕ değişim yüzdesi şahit numuneye göre %26.5 oranında artış gösterdiği görülmüştür. Kohezyon değerlerinin değişim oranı yüzdeleri incelendiğinde ise en yüksek artışın %2 katkılı 12 mm boyundaki bazalt fiber karışımı numunede olduğu ve kohezyon değişim yüzdesi şahit numuneye göre %88.74 oranında artış gösterdiği sonucuna varılmıştır.

50, 100 ve 150 kPa normal gerilmeler altında τ_{maks} değerlerinin şahit numuneye göre maksimum değişim yüzdeleri sırasıyla şu şekildedir; %2 fiber katkılı 12 mm fiber boyu bulunan karışımda %32.75, %2.5 fiber katkılı 24 mm fiber boyu bulunan karışımda %24.18 ve %1.5 fiber katkılı 24 mm fiber boyu bulunan karışımda %24.83 olarak hesaplanmıştır. Bu değerlendirmede %2.5 oranında 6 ve 12 mm boyundaki bazalt fiber karışımı numunelerin 150 kPa altında elde edilen τ_{maks} değerleri aykırı sonuçlar verdiği için değerlendirilmeye alınmamıştır ve Tablo 5.1’de kırmızı ile çizilmiştir. Elde edilen veriler neticesinde 6 mm boyundaki fiber katkısının fiber oranı yüzdeleri farklılık

gösterse de kohezyon (c), kayma direnci açısı (ϕ) ve maksimum kayma gerilmesi (τ_{max}) değerlerinin şahit numuneye göre olumlu yönde bir katkısı olmadığını söylemek yanlış olmayacaktır. Tablo 5.1'e bakıldığında 6 mm uzunluğundaki fiber katkılı numunelerin değişim yüzdesi oranlarının negatif değerlere sahip olması bu düşüncüyü doğrulamaktadır. Bazalt fiberlerin kısalık ve uzunluk miktarları düşünüldüğünde, kısa olan karışımlarda fiber-zemin kolonları da kısa kalmaktadır. Kolon ağları arasındaki etkileşim zayıflayarak gerilme iletimini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle fiber ile zemin arasındaki kaymanın daha kolay şekilde gerçekleştiği düşünülmektedir.

Diğer çalışmalar göstermiştir ki fiber yoğunluğunun ve uzunluğunun artmasıyla fiberler arası sürtünme ve elektrostatik etkileşimde artmalar olup bu artış fiberlerin zemin içerisinde topaklaşmasına neden olur. Topaklaşmanın olduğu noktalarda gerilme aktarımı açısından zayıf alanlar oluşur (Gao ve ark, 2015).

Fiber katkı oranları ve boyları incelenen, zeminin kohezyon ve kayma direnci açısı üzerindeki etkileri değişimleri toplu olarak Şekil 5.6'da gösterilmektedir.



Şekil 5.6. c ve ϕ değerlerinin grafiksel gösterimi.

Şekil 5.6'daki grafikler incelendiğinde;

- Artan fiber oranı ile kohezyon arasında sistematik bir ilişki saptanamamıştır. Bununla birlikte numunelere %1.5 oranında bazalt fiber katılmasıyla tüm boylarda kohezyon değerleri en düşük değerine sahipken bu orandan sonra artışa geçmiştir ve maksimum değerine %2 oranında 12 mm boyunda bazalt fiber katılmasıyla elde edilen numunede ulaşmıştır.
- Numunelere %1.5 oranında bazalt fiber katılmasıyla tüm boylarda kayma direnci açıları en yüksek değerine sahipken bu orandan sonra radikal bir

biçimde düşüğe geçmiştir ve maksimum değerine %1.5 oranında 24 mm boyunda bazalt fiber katılmasıyla elde edilen numunede ulaşmıştır.

Sonuçlardanda anlaşılacağı gibi kum zeminlere bazalt fiberin %1.5 oranında eklenmesi kayma direncini arttırıcı bir rol oynamaktadır. Ndepete (2019)'de siltli zeminlere bazalt fiber ekleyerek kayma direncindeki değişimleri incelediği tez çalışmasında %1.5 içeriğindeki fiber oranında kayma direncinin en yüksek değere ulaştığını gözlemlemiştir.

5.2. Kesme Gerilmesi ve Yatay Deformasyon Arasındaki İlişki

Doğal kum numunesi ve bazalt fiber katkılı kum numuneleri üzerinde yürütülen kesme kutusu deneylerinden elde edilen maksimum kayma gerilmesi değerleri Tablo 5.2'de verilmiştir. Şekil 5.7., Şekil 5.8., Şekil 5.9. ve Şekil 5.10'da ise farklı fiber oranlarında (%1, %1.5, %2 ve %2.5) ve farklı normal gerilmeler (50, 100 ve 150 kPa) altında kesme gerilmesi-yatay deformasyon grafikleri verilerek fiber boyları arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmede %2.5 oranında 6 ve 12 mm boyundaki bazalt fiber karışımli numunelerin 150 kPa altında elde edilen kayma gerilmesi değerleri aykırı sonuçlar verdiği için değerlendirilmeye alınmamıştır.

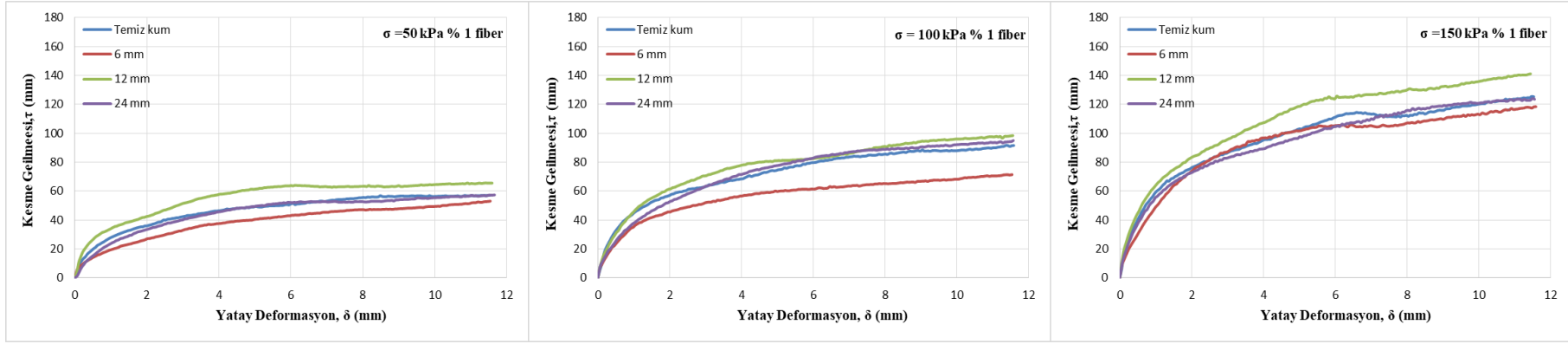
Tablo 5.2. Kesme kutusu deneylerinden elde edilen maksimum kayma gerilmesi değerleri

| Fiber Boyu (mm) | Fiber Oranı (%) | 50 kPa | 100 kPa | 150 kPa |
|--------------------|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | τ_{maks} (kPa) | τ_{maks} (kPa) | τ_{maks} (kPa) |
| 0 | 0 | 57.13 | 91.61 | 125.44 |
| 6 | 1 | 53.02 | 71.34 | 118.31 |
| 6 | 1.5 | 56.46 | 99.88 | 147.31 |
| 6 | 2 | 62.91 | 108.03 | 141.78 |
| 6 | 2.5 | 65.85 | 96.45 | 153.75 |
| 12 | 1 | 65.61 | 98.34 | 141.07 |
| 12 | 1.5 | 59.61 | 109.89 | 141.34 |
| 12 | 2 | 75.84 | 107.36 | 140.02 |
| 12 | 2.5 | 62.81 | 93.23 | 157.57 |
| 24 | 1 | 57.29 | 94.95 | 123.99 |
| 24 | 1.5 | 62.43 | 88.33 | 156.59 |
| 24 | 2 | 57.02 | 101.76 | 148.29 |
| 24 | 2.5 | 75.63 | 113.76 | 152.22 |

Şekil 5.7'de %1 fiber oranında ve farklı gerilmeler altında kesme gerilmesi-yatay deformasyon grafikleri görülmektedir. En yüksek τ_{maks} değeri; 50 kPa gerilme altında

12 mm fiber boyunda 65.61 kPa, 100 kPa gerilme altında 12 mm fiber boyunda 98.34 kPa, 150 kPa gerilme altında 12 mm fiber boyunda 141.10 kPa olarak bulunmuştur. Şekil 5.8'de %1.5 fiber oranında ve farklı gerilmeler altında kesme gerilmesi-yatay deformasyon grafikleri görülmektedir. En yüksek τ_{maks} değeri; 50 kPa gerilme altında 24 mm fiber boyunda 62.43 kPa, 100 kPa gerilme altında 12 mm fiber boyunda 109.89 kPa, 150 kPa gerilme altında 24 mm fiber boyunda 156.59 kPa olarak bulunmuştur. Şekil 5.9'da %2 fiber oranında ve farklı gerilmeler altında kesme gerilmesi-yatay deformasyon grafikleri görülmektedir. En yüksek τ_{maks} değeri; 50 kPa gerilme altında 12 mm fiber boyunda 75.84 kPa, 100 kPa gerilme altında 6 mm fiber boyunda 108.03 kPa, 150 kPa gerilme altında 24 mm fiber boyunda 148.29 kPa olarak bulunmuştur. Son olarak Şekil 5.10'da %2.5 fiber oranında ve farklı gerilmeler altında kesme gerilmesi-yatay deformasyon grafikleri görülmektedir. En yüksek τ_{maks} değeri; 50 kPa gerilme altında 24 mm fiber boyunda 75.63 kPa, 100 kPa gerilme altında 24 mm fiber boyunda 113.76 kPa, 150 kPa gerilme altında 24 mm fiber boyunda 152.22 kPa olarak bulunmuştur.

Bu bölümdeki tablo ve grafikler birlikte incelendiğinde çoğunlukla 24 mm boyundaki fiberlerde daha yüksek kesme gerilmeleri gözlemlenmiştir. Bu olumlu etkiyi 12 mm boyundaki fiberler takip ederken 6 mm boyundaki fiberlerin kesme gerilmesine etkisi çok daha azdır. Bu durum fiber boyu arttıkça fiber-zemin arasındaki temas alanının artmasıyla ilişkilendirilmektedir. Böylece fiberlerin zemin daneleri arasına girerek yanal gerilmelere karşı daha iyi direnç gösterdiği ve zemin danelerinin birbiri üzerinden kolayca kaymasını engellediği düşünülmektedir.

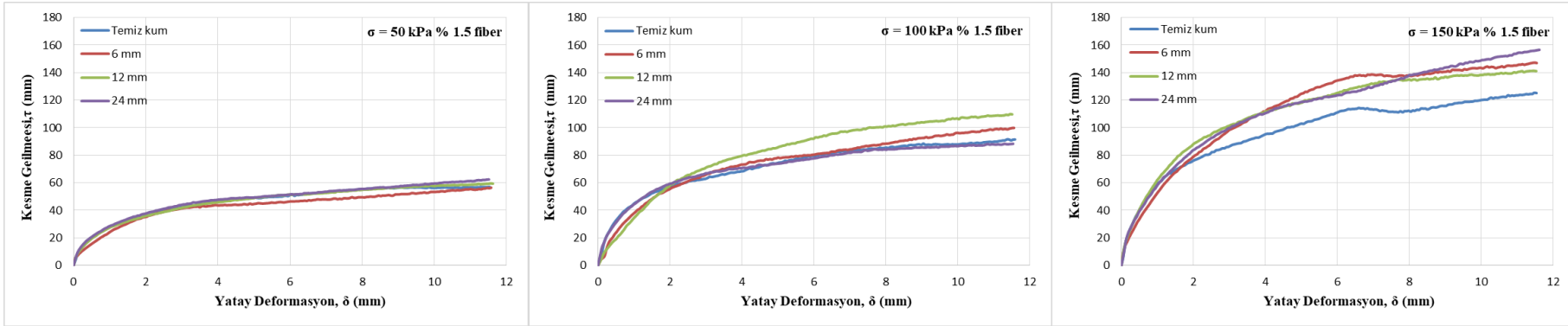


(a)

(b)

(c)

Şekil 5.7. %1 fiber oranında ve farklı normal gerilmeler altında kesme gerilmesi ve yatay deformasyona ait grafikler, (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 150 kPa.

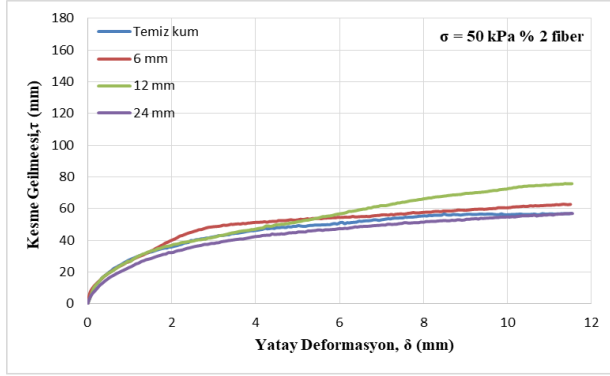


(a)

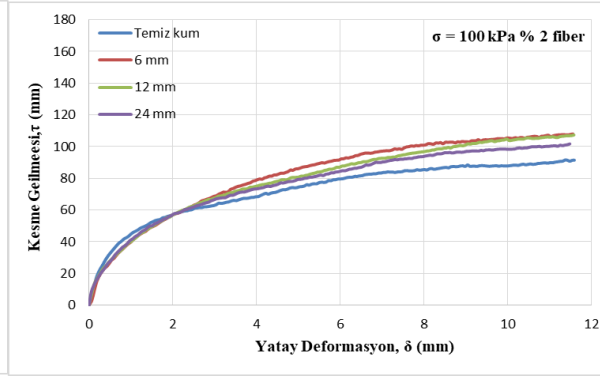
(b)

(c)

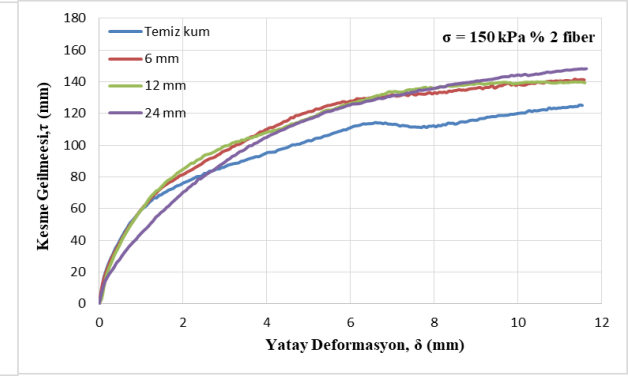
Şekil 5.8. %1.5 fiber oranında ve farklı normal gerilmeler altında kesme gerilmesi ve yatay deformasyona ait grafikler, (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 150 kPa.



(a)



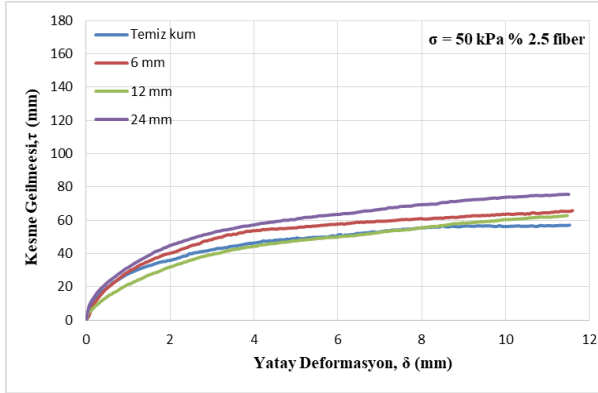
(b)



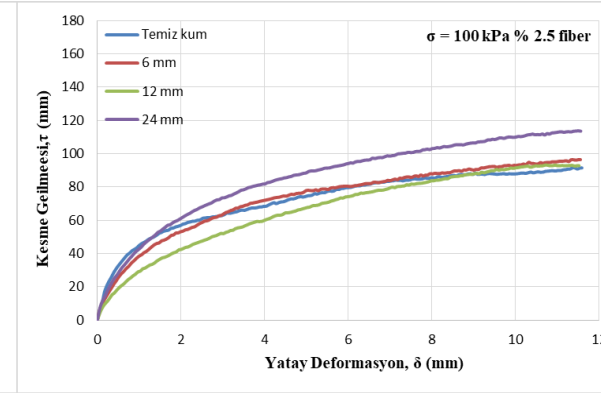
(c)

Şekil 5.9. %2 fiber oranında ve farklı normal gerilmeler altında kesme gerilmesi ve yatay deformasyona ait grafikler, (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 150 kPa.

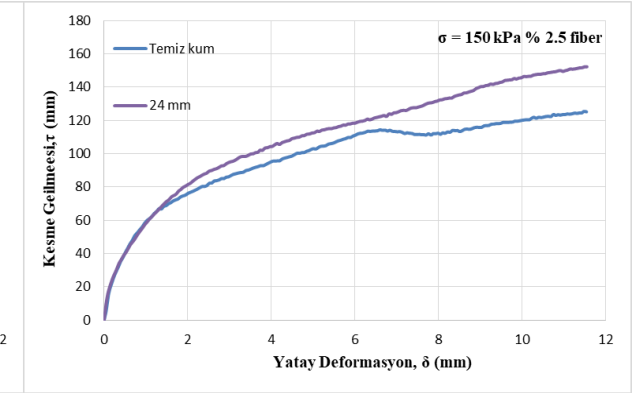
59



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.10. %2.5 fiber oranında ve farklı normal gerilmeler altında kesme gerilmesi ve yatay deformasyona ait grafikler, (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 150 kPa.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Son yıllarda geoteknik mühendisliği uygulamalarında zemine katkı malzemeleri katılarak iyileştirme yöntemi oldukça yaygındır. Bu katkı malzemelerine doğal lif olarak sınıflandırılan yüksek mukavemetli bazalt fiberler örnek olarak verilebilir. Bu tezde yapılan deneysel çalışmalarla kumlu zeminlerin kayma direncine bazalt fiberin katkısı incelenmiştir.

Deneyleerde kullanılan kum Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarı'ndan alınmıştır. Doğal kum zeminine ağırlıkça %0, %1, %1.5, %2, %2.5 oranında ve boy olarak 6 mm, 12 mm, 24 mm uzunluğundaki bazalt fiberler katılarak hazırlanan numuneler sabit bir rölatif sıklık değerinde olacak şekilde kesme kutusuna yerleştirilmiştir. Yerleştirilen numuneler 50, 100 ve 150 kPa normal gerilmeler altında kesme kuvvetine maruz bırakılarak kesilmiştir. Bazalt fiber katkılı ve katkısız kum numuneleri üzerinde toplamda 39 adet kesme kutusu deneyi gerçekleştirilmiştir.

Artan fiber oranı ile kohezyon arasında sistematik bir ilişki saptanamamıştır. Bununla birlikte numunelere %1.5 oranında bazalt fiber katılmasıyla tüm boylarda kohezyon değerleri en düşük değerine sahipken bu orandan sonra artışa geçmiştir ve maksimum değerine %2 oranında 12 mm boyunda bazalt fiber katılmasıyla elde edilen numunede ulaşmıştır.

Numunelere %1.5 oranında bazalt fiber katılmasıyla tüm boylarda kayma direnci açıları en yüksek değerine sahipken bu orandan sonra radikal bir biçimde düşüşe geçmiştir ve maksimum değerine %1.5 oranında 24 mm boyunda bazalt fiber katılmasıyla elde edilen numunede ulaşmıştır. Sonuçlardanda anlaşılacağı gibi kum zeminlere bazalt fiberin %1.5 oranında eklenmesi kayma direncini arttırıcı bir rol oynamaktadır. Bu oranının üzerinde fiberler kendi arasında topaklaşma eğiliminde olmakta ve zemin içerisinde homojen bir şekilde dağılamamaktadır.

Farklı fiber oranları, boyları ve farklı normal gerilmeler altında elde edilen kesme gerilmesi grafiklerinde genellikle 24 mm boyundaki fiberlerde daha yüksek kesme gerilmeleri gözlemlenmiştir. Bu durum fiber boyu arttıkça fiber-zemin arasındaki temas alanının artmasıyla ilişkilendirilmektedir.

Böylece fiberlerin zemin daneleri arasına girerek yanal gerilmelere karşı daha iyi direnç gösterdiği ve zemin danelerinin birbirini üzerinden kolayca kaymasını engellediği düşünülmektedir.

Deney süreçlerinde bazalt fiber oranı ve uzunluğu arttıkça kum zemin içerisinde homojen karıştırılması zorlaşmıştır ve fiberli karışımlar kesme kutusuna aktarılırken homojenliği korumak daha da zorlaşmıştır. Topaklaşmaya engel olmak adına fiberlerin hava basıncıyla ayrılmamış orijinal halleriyle ve daha büyük ölçekli kesme kutusu testlerinde çalışılabilir.

Kesme kutusu deneyleri 50, 100 ve 150 kPa olmak üzere üç farklı gerilmeler altında gerçekleştirilmiştir ve bazı 150 kPa'lık normal gerilmelerin sonuçlarında aykırı değerler saptanmıştır. Bu nedenle benzer çalışmaların daha düşük ve daha fazla sayıda (en az 4) normal gerilmeler altında tekrarlanması önerilir.

KAYNAKLAR

- Akyıldız, M. H. (2019). Zemin İyileştirme Yöntemleri. A. A. Eker ve A. Dikicioğlu (Eds.), *Mühendislik ve Multidisipliner Yaklaşımlar* (ss. 147). Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları
- Alp, M. S. (2019). *Jüt ve keten fiber takviyeli kompozitlerin frezelenme performansının belirlenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Batman Üniversitesi
- Aral, M. (2006). *Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı bir optimum tasarım* [Yüksek Lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi
- Arslan, M.E. (2017). Bazalt liflerin geleneksel betonların mekanik özellikleri ve kırılma enerjilerine etkilerinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(3), 203-208. [https://doi: 10.5505/pajes.2016.95815](https://doi.org/10.5505/pajes.2016.95815)
- ASTM D 4253 (2006). Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table. ASTM WestConshohocken, PA. 15 pp.
- ASTM D 4254 (2006). Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table. ASTM WestConshohocken, PA. 15 pp.
- ASTM D854-02 (2002). Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer, American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA
- Aydınlar Madencilik. (2022, 12 Aralık). Bazalt. <https://aydinlarmadencilik.com.tr/endustriyel-kumlar/bazalt/> adresinden 12 Aralık 2022 tarihinde alınmıştır.
- Ayininuola, G. M., Oladotun, P. O. (2016). Geotechnical Properties of Coconut Coir Fiber Soil Mixture. *Journal of Civil Engineering Research*, 6(4), 79-85. [https://doi: 10.5923/j.jce.20160604.01](https://doi.org/10.5923/j.jce.20160604.01)
- Ayininuola, G. M., Udoh, E. G. (2018). Geotechnical properties of flax fiber stabilized soil. *Journal of Earth Science and Engineering*, 8, 75-82. [https://doi: 10.17265/2159-581X/2018.02.003](https://doi.org/10.17265/2159-581X/2018.02.003)
- Bildik, S. (2017). Zemin İyileştirme Yöntemleri [Sunum] Nişantaşı Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü İstanbul, Türkiye
- Bilgen, G., Kavak, A., Çapar, Ö. F. (2012). Düşük plastisiteli bir kilde katkı olarak çelikhane cürufunun kullanılması ve kireç ile etkileşimi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi (Karaelmas Science And Engineering Journal)*, 2 (2), 30-38. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen/issue/57130/806047> adresinde 2 Aralık 2022 tarihinde alınmıştır.
- Brandt, A.M. (2008). Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite Structures*, 86(1-3), 3-9. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.006>.

- Cömert, A. T. (2012). *Uçucu kül, mermer tozu ve endüstriyel atık kumu yol alt yapısında kullanılabilirliğinin araştırılması* [Doktora Tezi]. Sakarya Üniversitesi
- Çetin, A. Y. (2011). *Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler İle Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu* [Yüksek Lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Çınar, H. (2014). *Zemin iyileştirilmesinde jet grout yöntemi ve uygulamaya yönelik proje çalışmaları* [Yüksek Lisans tezi]. Erciyes Üniversitesi
- Diallo, M. L. (2019). *Atık malzeme kullanımı ile kil zeminlerin stabilizasyonu* [Yüksek Lisans tezi]. Uludağ Üniversitesi
- Dostkimya. (2022, 12 Aralık). Bazalt Elyaf Kırpılmış Satışı. <https://dostkimya.com.tr/tr/haberler/bazalt-elyaf-kirpilmis-satisi> adresinden 12 Aralık 2022 tarihinde alınmıştır.
- Edinçliler, A., Ayhan, V. (2010). Lastik donatı ilavesinin kumun kesme mukavemetine etkisi. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi*, İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul.
- Erginer, M., Kahraman, O., Ersin, A. B., Türedi, Y., Örnek, M. (2019). Lastik atık katkılı zeminlerde CBR değerinin araştırılması. *OKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2 (1), 41-44. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/okufbed/issue/51347/656408> adresinden 15 Kasım 2022 tarihinde alınmıştır.
- Eskier, U. (2017, 28 Mart). Lavlardan Doğan Bazalt Taşı Nedir, Nerelerde Kullanılır. <https://www.makaleler.com/bazalt-tasi-nedir-nerelerde-kullanilir> adresinden 12 Aralık 2022 tarihinde alınmıştır.
- Fırat, S., Dikmen, S., Yılmaz, G., Khatib, J. M. (2020). Characteristics of engineered waste materials used for road subbase layers. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(9), 2643-2656. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-2242-0>
- Foose, G. J., Benson, C.H., Bosscher, P.J. (1996). Sand Reinforced with Shredded Waste Tires. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 122 (9), 760-767
- Gao, L., Hu, G., Xu, N., Fu, J., Xiang, C., Yang, C. (2015). Experimental study on unconfined compressive strength of basalt fiber reinforced clay soil. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Materials Science and Engineering*, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2015/561293>
- Geçkil, T., Sarıcı, T., Yıldırım, E. S. (2019). Kireç Katkısı ile Kil Bir Zeminin Dayanımının İyileştirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(4), 171-179. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.704212>
- Gobinath, R., Mahesh, V., Shyamala, G., Rajesh, A. (2020, October, 9-10). Strength and Settlement studies on basalt fiber reinforced marginal soil. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 981, Warangal, India. <https://doi:10.1088/1757-899x/981/3/032083>
- Haeberle, D.C., Senne, J. L., Lesko, J. J., Cousins, T. E. (2000). Performance and interfacial stresses in the polymer wear surface/FRP deck bond due to thermal loading. *In Advanced Composite Materials In Bridges and Structures: 3rd International Conference*, 13-15.

- Hausmann, M.R. (1990). *Engineering Principles of Ground Modification* (pp. 632). McGraw-Hill College, New York
- Himanshu, B., Jauhari, N., Varshney, H. (2017). Performance and Analysis of Coir Fibre as Soil Reinforcement. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 5, 67-72. <https://doi:10.13140/rg.2.2.36230.40008>
- Holtz, R. D., Shang, J. Q., Bergado, D. T. (2001). Soil Improvement. R.K. Rowe (Ed.), *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook* (pp. 430). Springer, Boston, MA.
- Karadağ H., Fırat S., Işık N. S. (2020). Çelikhane cürufunun yol temel ve alttmel malzemesi olarak kullanılması. *Politeknik Dergisi*, 23(3), 799- 812. <https://doi.org/10.2339/politeknik.612190>
- Kavak, A., Güngör, A. G., Avşar, C., Atbaş, B., Akyarlı, A. (2008, Ekim, 16-17). Bölünmüş Yol Çalışmalarında Bir Kireç Stabilizasyonu Uygulaması. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye
- Keskin, S., Laman, M. (2012). Atık Lastik-Kum Karışımlarının Kayma Mukavemetinin Laboratuar Deneyleriyle İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(2), 27-35, <https://dergipark.org.tr/tr/pub/cukurovaummfd/issue/22761/242943> adresinde 18 Kaim 2022 tarihinde alınmıştır.
- Khelifi, H., Lecompte, T., Perrot, A., Ausias, G. (2016). Mechanical enhancement of cement-stabilized soil by flax fibre reinforcement and extrusion processing. *Materials and Structures*, 49(4), 1143–1156. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0564-z>
- Kılıç, G. (2008). *Çimento İle Zemin Stabilizasyonu* [Yüksek Lisans tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi
- Kızılcılık, M. M. (2010). *Yüksek plastisiteli bir kilin kireç ile stabilizasyonu* [Yüksek Lisans tezi]. Kocaeli Üniversitesi
- Kızıllanat, A. B., Kabay, N., Akyuncu, V., Erdoğan, G. (2014). Bazalt lifler ve basaltlifli betonların mekanik özellikleri. *Sigma Muhendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 32(4), 444-452.
- Kilit, M., Çavuş, U. Ş., Zorluer, İ. (2021). Portland Kompoze Çimento Katkısı ile Şişen Killerin Stabilizasyonu. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology (JICIVILTECH)*, 3(2), 185-195. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jiciviltech/issue/67678/999208> adresinden 2 Aralık 2022 tarihinde alınmıştır.
- Kumar, A., Walia, B. S., Mohan, J. B. (2006). Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay. *Construction and Building Materials*, 20(10), 1063–1068. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.027>
- Kumbhar, V.P. (2014). An overview: Basalt rock fibers-new construction material. *Acta Engineering, International*, 2(1), 1-18.
- Kurt, G. (2006). *Lif içeriği ve su/çimento oranının fibrobetonun mekanik davranışına etkileri* [Yüksek Lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi

- Li, W., Xu, J. (2009). Impact characterization of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete using a 100-mm-diameter split Hopkinson pressure bar. *Materials Science and Engineering A*, (513-514), 145–153. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.02.033>
- Mitchell, J. K. (1981). Soil Improvement State of The Art Report . In Proceedings 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (pp. 509-521). Balkema.
- Motz, H., Geiseler, J. (2001). Products of steel slags an opportunity to save natural resources. *Waste Management*, 21(3), 285-293. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00102-1](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00102-1)
- Ndepete, C. P. (2017). *Bazalt fiber katkısının siltli zeminlerde kayma direncine etkisi* [Doktora Tezi]. Sakarya Üniversitesi
- Ndepete, C. P., Sert, S. (2017). Experimental investigation of mechanical behavior of basalt fiber reinforced saturated silty soil. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi (ICOCEE 2017 Özel Sayı)*, 6, 341-348. <https://doi.org/10.17100/nevbiltek.322678>
- Ocakbaşı, P. (2019). *Bazalt fiber katkısının killi zeminlerin drenajsız kayma direncine etkisi* [Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Üniversitesi
- Okyay, U. S., Dias, D. (2010). Use of Lime and Cement Treated Soils as Pile Supported Load Transfer Platform. *Engineering Geology*, 114(1-2), 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.03.008>
- Öngü, K. T. (2017). *İsdemir çelikhane (BOF) curufunun zeminlerin donma çözünme davranışına etkisinin araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi]. İskenderun Teknik Üniversitesi
- Öztoprak, S. (2016, Kasım). Zeminlerin İyileştirilmesi: Yöntemlere Genel Bir Bakış [Sunum] İstanbul Üniversitesi - İnşaat Mühendisliği Bölümü İMO İstanbul/Karaköy, Türkiye
- Parnas, R., Shaw, M., Liu, Q. (2007). Basalt fiber reinforced polymer composites. Report Prepared for The New England Transportation Consortium. NETCR63, Project No. 03-7.
- Rowell, R. M, Han J. S., Rowell J. S. (2000). Characterization and factors effecting fiber properties. *Natural Polymers and Agrofibers Composites*, 115–34.
- Saravanan, D. (2006). Spinning the rocks- basalt fibers. *Part TX: Textile Engineering Division*, 86, 39-45. *Journal of the Institution of Engineers (India)*,
- Sariosseiri, F., Muhunthan, B. (2008, March, 9-12). Geotechnical properties of Palouse Loess modified with cement kiln dust and Portland cement. GeoCongress, New Orleans, Louisiana, United States, 978- 0-7844-0972-5.
- Sarkar, R., Das, S. K., Mandal, P.K., Maiti, H. S. (2004). Phase and microstructure evolution during hydrothermal solidification of clay-quartz mixture with marble dust source of reactive lime. *Journal of the European Ceramic Society*, 26(3), 297-304. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2004.11.006>
- Sarsılmaz, O. M. (2017). *Zemin iyileştirme yöntemlerinin sınıflandırılması, incelenmesi, değerlendirilmesi ve anılan yöntemlerin seçilme kriterleri üzerine kapsamlı bir araştırma* [Yüksek Lisans tezi]. Ege Üniversitesi

- Segetin, M., Jayaraman, K., Xu, X. (2007). Harakeke reinforcement of soil–cement building materials: manufacturability and properties. *Building and Environment*, 42, 3066–3079. <https://doi:10.1016/j.buildenv.2006.07.033>
- Selçuk, E. S. (2021). *Lifli bitümlerle stabilize edilen kum zeminlerin dinamik özellikleri* [Yüksek Lisans tezi]. Karadeniz Teknik Üniversitesi
- Shah, B. (1995). *Fiber-Reinforced Composites*, American Concrete Enstitute, Detroit USA.
- Sim, J., Park, C., Moon, D.Y. (2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Composites: Part B*, 36(6-7), 504-512. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2005.02.002>
- Sukontasukkul, P., Jamsawang, P. (2012). Use of steel and polypropylene fibers to improve flexural performance of deep soil-cement column. *Construction and Building Materials*, 29(1), 201-205. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.040>
- Sungur, A., Yazıcı, M. F., Keskin, S. N. (2021). Bazalt lifi ile güçlendirilmiş killi zeminin mühendislik özellikleri üzerine deneysel araştırma. *European Journal of Science and Technology*, (28), 895-899. <https://doi:10.31590/ejosat.1011881>
- Şahbaz, İ. (2020). *Çimento ve polipropilen lif kullanarak killi zeminlerin iyileştirilmesi* [Yüksek Lisans tezi]. Uludağ Üniversitesi
- Totiç, E., Göktepe, F., Yaşar, M. (2019). Uçucu kül katkısının killi zeminlerin mekanik özelliklerine etkisi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(2), 769-778. <https://doi.org/10.24012/dumf.474528>
- TSE. 2000. TSE1500 İnşaat Mühendisliğinde Zemin Sınıflandırması, Ankara
- Türedi, Y., Örnek, M., Bal, B. B., Işık, A. O. (2017). Çelikhane cürufu katkısının CBR sonuçlarına etkisinin araştırılması. 7. Geoteknik Sempozyumu, İstanbul, Türkiye
- Türker, S., Balanlı, A. (1992). Yapı Malzemeleri. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul (ss. 45-72)
- Türkiye Çelik Üreticileri Derneği (2015). Demir Çelik Cüruf Raporu. ÇŞB, Ankara https://celik.org.tr/wp-content/uploads/2016/12/4-TCUD-Curuf_Rapor.pdf adresinden 15 Kasım 2022 tarihinde alınmıştır.
- Tüylüce, F. (2010). *Deniz killerinin kireç stabilizasyonu ile iyileştirilmesi* [Yüksek Lisans tezi]. Kocaeli Üniversitesi
- Uğur, N. (2009). *Fiberle rastgele donatılmanın kum zeminlerin mekanik özelliklerine etkisi* [Yüksek Lisans tezi]. Ege Üniversitesi
- Umar, F., Açar, E. (1985). *Yol Üstyapısı* (3. Baskı, ss. 255) İTÜ Yayınları, İstanbul
- Ünlü Şahan, M. (2016). *Yapım işlerinde zemin iyileştirme yöntemleri*. [Uzmanlık tezi]. İller Bankası Anonim Şirketi
- Ünver, E. (2015). *Problemlili kil zeminlerin uçucu kül ile iyileştirilmesi* [Yüksek Lisans tezi]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
- Wikipedia (2022, 9 Aralık). Uçucu Kül. https://tr.wikipedia.org/wiki/U%C3%A7ucu_k%C3%BCI adresinden 9 Aralık 2022 tarihinde alınmıştır.

- Witczak, M. W., Yoder, E. J. (1975). *Principles of Pavement Design* (2nd ed., pp 736). A wiley interscience publication. USA
- Yıldırım, B., Alataş, T., Dağdelen, Ş. (2006). Zemin Stabilizasyonunda Bitüm Kullanılması ile Üst Yapıda Sağlanacak Ekonominin Araştırılması https://www.imo.org.tr/Eklenti/2782,1542pdf.pdf?0&_tag1=67026E2029EF5E7223C4368FC4F137B03253E96C adresinden 6 Aralık 2022 tarihinde alınmıştır.
- Yıldız, Y. (2020). *Killi bir zeminin çimento ile stabilizasyonu* [Yüksek Lisans tezi]. Kocaeli Üniversitesi
- Yılmaz, F. (2020). Uçucu kül ve mermer tozu katkılarının zeminin stabilizasyonuna ve donma-çözülmesine etkisinin araştırılması. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 8(1), 56-61. <https://doi.org/10.21541/apjes.488373>
- Zorluer, İ., Gücek, S. (2019, Ekim, 23-25). Şişen killerin mermer tozu katkı maddesiyle stabilizasyonu. International Symposium on Innovations in Civil Engineering and Technology (ICIVILTECH), Afyonkarahisar, Türkiye
- Zornberg, J.G., Alexandre, R.C., Viratjandr, C. (2004). Behaviour of Tire Shred-Sand Mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(2), 227-241. <https://doi:10.1139/t03-086>.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Melike ÖZTOPRAK

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2023, Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Geoteknik Bilim Dalı
- **Lise** : 2012, Bolu Atatürk Anadolu Lisesi

MESLEKİ DENEYİM

- 2017-2022 yılları arasında Aladağ Yapı Denetim Ltd. Şti.'de ve Lef Yapı İnşaat Telekomünikasyon ve Tic. A.Ş.'nde İnşaat Mühendisi olarak çalıştı.