

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

**KİLLİ ZEMİNLERİN KAYMA DİRENCİNE BAZALT
FİBERİN KATKISI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selen TERZİ

Enstitü Anabilim Dalı	: İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı	: GEOTEKNİK
Tez Danışmanı	: Doç. Dr. Ertan BOL

Haziran 2021

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

**KİLLİ ZEMİNLERİN KAYMA DİRENCİNE BAZALT
FİBERİN KATKISI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selen TERZİ

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

**Bu tez 30/06/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu
ile kabul edilmiştir.**

Jüri Başkanı

Üye

Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Selen TERZİ

30.06.2021

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca kendisinden ders alıp tecrübelerinden faydalandığım aynı zamanda bilgi, birikim ve donanımlarını bana aktarmaktan çekinmeyen pek kıymetli tez danışmanım Doç. Dr. Ertan BOL'a teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca ve tez süresince kendisinden ders ve destek aldığım, bilgi, birikim, tecrübe ve fikirlerini esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Öğretim Üyeleri Doç. Dr. Sedat SERT ve Doç. Dr. Aşkın ÖZOCAK'a, laboratuvar çalışmalarımda her türlü desteği sağlayan tekniker Recep EYÜPLER ve tekniker Sebahattin İŞ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Bu meşakkatli süreçte madden ve manen desteğini esirgemeyen canım aileme ve canım arkadaşım Melike AKYÜZ'e ve bilhassa yılmadan, usanmadan çalışmaya devam etmiş olan KENDİME çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLOLAR LİSTESİ	ix
ÖZET.....	ix
SUMMARY	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ VE AMAÇ	1
BÖLÜM 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	4
2.3.1. Uçucu kül, kireç ve yüksek fırın cürufu katkısı.....	4
2.3.2. Mermer tozu ve pomza katkısı.....	7
2.3.3. Çelikhane cürufu katkısı	8
2.3.4. Cam atık çamuru katkısı	10
2.3.5. Atık granit katkısı	10
2.3.6. Atık lastik katkısı	11
2.3.7. Sentetik akışkan ve fiber katkısı	13
2.3.8. Jüt, çelik fiber ve kireç katkısı	14
2.4. Fiber Katkısı ile Zemin İyileştirme	15

2.4.1. Doğal fiber katkısı	16
2.4.1.1. Hindistan cevizi kabuğu katkısı	17
2.4.1.2. Keten fiber katkısı	18
2.4.1.3. Jüt fiber katkısı	18
2.4.2. Yapay fiber katkısı	20
2.4.2.1. Polipropilen (PP) fiber katkısı	20
2.4.2.2. Polyester (PET) fiber katkısı	21
2.4.2.3. Naylon fiber katkısı	22
BÖLÜM 3.	
BAZALT VE BAZALT FİBERLER	23
3.1. Bazalt Fiber Üretimi ve Özellikleri	24
3.2. Betonda Bazalt Fiber Katkısı	25
3.3. Zemin İyileştirmesinde Bazalt Fiber Katkısı	26
BÖLÜM 4.	
MALZEMELER VE YÖNTEM	29
4.1. Malzemeler	29
4.1.1. Kil zemin	29
4.1.2. Bazalt fiber	31
4.2. Yöntem	31
4.2.1. Fiziksel deneyler	32
4.2.1.1. Atterberg limitleri	33
4.2.1.2. Elek analizi, hidrometre ve özgül ağırlık deneyleri	36
4.3. Doygun Numunelerin Konsolide Edilerek Hazırlanması	37
4.4. Kesme Kutusu Deneyleri	41
BÖLÜM 5.	
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	43
5.1. Kayma Direnci Parametreleri Deney Sonuçları	43
5.2. Kesme Gerilmesi ve Yatay Deformasyon Arasındaki İlişki	50

5.3. %4 Deformasyonda Kesme Gerilmesi ve Fiber Oranı Arasındaki İlişki.....	53
BÖLÜM 6.	
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	56
KAYNAKLAR	58
ÖZGEÇMİŞ	63



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

BOS	: Çelikhane cürufu (Basic oxygen furnace slag)
c	: Kohezyon
CaCO ₃	: Kalsiyum karbonat
CaO	: Kalsiyum oksit
CBR	: Kaliforniya taşıma oranı (California bearing ratio)
CH	: Yüksek plastisiteli kil
CHO	: Yüksek plastisiteli organik kil
CL	: Düşük plastisiteli kil
Fe ₂ O ₃	: Demir (III) oksit
G _s	: Özgül ağırlık
NaCl	: Sodyum klorür
PE	: Polietilen
PET	: Polyester
PP	: Polipropilen
PVA	: Polivinil alkol
SiO ₂	: Silisyum dioksit
TS	: Türk Standardı
UCS	: Serbest basma dayanımı (Unconfined compression strength)
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi
w _L	: Likit limit
w _P	: Plastik limit
σ	: Normal gerilme
τ	: Kesme gerilmesi
φ	: Kayma direnci açısı
ρ _n	: Doğal birim hacim ağırlık
ΔH	: Yatay deformasyon

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Dane boyutuna göre zemin iyileştirme yöntemleri.....	4
Şekil 2.2. Çalışmada kullanılan jüt ve çelik fiber örnekleri.....	15
Şekil 3.1. Bazalt taşı örnekleri	23
Şekil 3.2. Bazalt fiber üretim prosesi	24
Şekil 4.1. Kil zemin numunesinin ayrıştırılıp elenmesi.	30
Şekil 4.2. Kil zemin numunesine ait dane dağılım eğrisi.....	30
Şekil 4.3. Bazalt fiberin makro ve mikroskopik görünümü	31
Şekil 4.4. Casagrande ve Koni Penetrometre deneyi yapılışı.	34
Şekil 4.5. Plastik limit deneyi yapılışı.....	35
Şekil 4.6. Likit limit akma doğrusu.....	35
Şekil 4.7. Kilin TS 1500/2000 plastisite kartındaki yeri.	36
Şekil 4.8. Hidrometre ve özgül ağırlık deneyine ait fotoğraflar.	37
Şekil 4.9. Farklı uzunluktaki bazalt fiberlerin basınçlı hava ile ayrıştırılmış ve orijinal halleri.....	38
Şekil 4.10. (a) Fiber ve su ilaveli kil zemin, (b) Bazalt fiber ilaveli bulamaç karışım, (c) Karışımın hava kabarcıklarından arındırılması, (d) Karışımın hücreye alınması.	39
Şekil 4.11. (a) Hücre içerisindeki numune örneği, (b) Hücrenin tabanında bulunan konsolideyi sağlayan ince kum, (c) Hücre içinden numunelerin tedariki, (d) Kesme kutusu çelik halkası içine alınmış numune örneği, (e) Numunenin yüzeyinin spatula ile düzgünleştirilme.	40
Şekil 4.12. Kesme kutusu cihazı.	41
Şekil 4.13. Kesme kutusu deneyi sonrası bütün zemin örnekleri.	42
Şekil 5.1. Saf kil numunesi.	43
Şekil 5.2. %1 fiber oranı (a) 6 mm, (b) 12 mm, (c) 24 mm.	44
Şekil 5.3. %1,5 fiber oranı (a) 6 mm, (b) 12 mm, (c) 24 mm.	45

Şekil 5.4. %2 fiber oranı (a) 6 mm, (b) 12 mm, (c) 24 mm.	46
Şekil 5.5. %2,5 fiber oranı (a) 6 mm, (b) 12 mm, (c) 24 mm.	47
Şekil 5.6. C ve σ_c değerlerinin grafiksel gösterimi.	50
Şekil 5.7. Kesme gerilmesi ve yatay deformasyona ait grafikler (a) %1 fiber oranı, (b) %1,5 fiber oranı, (c) %2 fiber oranı, (d) %2,5 fiber oranı.	51
Şekil 5.8. Farklı sıcaklıklarda ısıtmanın ardından tek bazalt lifi için çekme gerilme- gerinim eğrileri	53
Şekil 5.9. 6 mm bazalt için %4 deformasyona denk gelen kesme gerilmesi- fiber oranı ilişkisi.	54
Şekil 5.10. 12 mm bazalt için %4 deformasyona denk gelen kesme gerilmesi- fiber oranı ilişkisi.	54
Şekil 5.11. 24 mm bazalt için %4 deformasyona denk gelen kesme gerilmesi- fiber oranı ilişkisi.	55

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Fiber çeşitleri	16
Tablo 2.2. Değişik fiber çeşitlerine ait tipik özellikler.....	16
Tablo 4.1. Kil numunesinin fiziksel özellikleri.....	30
Tablo 4.2. Bazalt fibere ait fiziksel ve mekanik özellikler	31
Tablo 4.3. Karışımlardaki kil ve fiber ağırlığı, fiber boyu ve oranları.....	32
Tablo 5.1. Kayma direnci parametrelerine ait değerler.....	48

ÖZET

Anahtar kelimeler: Killi zemin, kayma direnci, kesme kutusu, zemin iyileştirme, bazalt fiber.

Kozmopolit şehirlerde artan hızlı nüfus hızlı kentleşmeyi beraberinde getirip, yeni yeraltı ve yerüstü yapıların yapılma zorunluluğu zeminleri kıymetli kılmıştır. Olumsuz zemin koşullarında, eğer uygun yer seçimi ve yapısal değişiklik seçeneklerini hayata geçirmek mümkün değilse, yapı inşasının zorunlu olduğu durumlarda zeminleri iyileştirme işlemi sıklıkla başvurulmuş bir yol olmuştur. Yapılan zemin iyileştirme işlemlerinin, zeminin taşıma gücünü artırma, sıvılaşma riskini azaltma, oturumları kontrol altına alma, kayma direnci parametrelerini artırma gibi işlevlerinin yanında çevre dostu ve ekonomik olması da ön planda tutulmaktadır. Günümüzde çimento ve kireç gibi geleneksel katkı malzemeleri yanında, artan teknoloji ve bilgi birikimi ile fiber gibi daha teknolojik malzemelerin yardımıyla zeminleri iyileştirme inşaat mühendisliğinin bir parçası haline gelmiştir. Zemin iyileştirme ve beton iyileştirmede kullanılan, çevre dostu, doğal ve geniş bir hammadde tabanına sahip olan katkı malzemelerinden biri de bazalt fiberdir. Bazalt fiberin zemin iyileştirme çalışmalarında kullanımına yönelik çalışmaların literatürde giderek arttığı görülmektedir.

Bu tez çalışmasında, Düzce ilinden elde edilen killi zeminlere bazalt fiber katkısının kayma direnci parametrelerine olan etkisi araştırılmıştır. Türk Standardı (TS1500) ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemine (USCS) göre yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfında olan ince daneli zemin örneklerine belirli oranlarda bazalt fiber eklenmiş ve ardından hazırlanan bu numuneler kesme kutusu deneylerine tabi tutulmuştur. Belirli ağırlıktaki doğal kil numunesine ağırlıkça %0, %1, %1,5, %2 ve %2,5 oranında 6 mm, 12 mm ve 24 mm uzunluğunda bazalt fiber ilave edilip bulamaç (*slurry*) yöntemi ile numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler daha sonra 45 kPa yük altında 7 gün süre ile konsolidasyona bırakılmıştır. En son olarak da konsolide olan numuneler, farklı düşey gerilmeler ile kesme kutusunda deneye tabi tutulmuşlardır. Gerçekleştirilen 39 adet deney sonucuna göre; bazalt fiber oranı ve boyu arttıkça kayma direnci açısından doğrusal olmayan bir artış gözlemlenirken, kohezyon değerinde ise bazalt fiber uzunluğuna bağlı olarak farklı bazalt fiber oranlarında pik değerler olduğu gözlemlenmiştir. 6 mm fiber uzunluğunda çalışılmış numunelerde kohezyon değeri %2 fiber oranında pik yapmış iken, 12 mm fiber uzunluğunda çalışılmış numunelerde kohezyon değeri %1,5, 24 mm fiber uzunluğunda çalışılmış numunelerde ise kohezyon değeri %1 fiber oranında pik yapmıştır. Bu durum fiber - zemin arasındaki etkileşim, fiber boyu ve fiber oranı (numune içerisindeki fiber yoğunluğu) ile açıklanmaktadır. Bazalt fiber kullanımının zemin iyileştirme çalışmalarında alternatif olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

CONTRIBUTION OF BASALT FIBER TO SHEAR STRENGTH OF CLAYEY SOILS

SUMMARY

Keywords: Clayey soil, shear strenght, shear box, soil improvement, basalt fiber.

The increasing population in cosmopolitan cities brought along rapid urbanization, and the necessity of building underground and aboveground structures made the soils valuable. In unfavorable soil conditions, if it is impossible to implement the appropriate location selection and structural change options, soil improvement has been a common method in situations where building construction is necessary. In addition to the functions of soil improvement processes such as increasing the bearing capacity of the soil, reducing the risk of liquefaction, taking control of settlements, increasing the shear strength resistance parameters, it is also emphasized that they are environmentally friendly and economical. Today, in addition to traditional additives such as cement and lime, with increasing technology and knowledge and more technological materials such as fiber, soil improvement has become a part of civil engineering. Basalt fiber is one of the additives used in soil improvement and concrete improvement, which is environmentally friendly, natural, and has a broad raw material base. Soil improvement studies with basalt fiber are increasing in the literature.

In this thesis study, the effect of basalt fiber additive on the shear resistance parameters on clayey soils obtained from Düzce province was investigated. Basalt fiber was added to the fine-grained soil samples, which are in the high plasticity clay (CH) class according to the Turkish Standard (TS1500) and the Unified Soil Classification System (USCS), and then subjected to shear box tests. 6 mm, 12 mm and 24 mm long basalt fiber was added to the natural clay sample with a certain weight (0%, 1%, 1.5%, 2%, and 2.5% by weight), and samples were prepared by the slurry method. It was then left to pre-consolidation for 7 days under a 45 kPa load. On the consolidated samples, they were tested with different vertical stresses in the shear box. According to the results, a nonlinear increase was observed in the internal friction angle as the basalt fiber ratio and length ascend. On the other hand, the cohesion value had peaks at different basalt fiber ratios depending on the basalt fiber length. While the cohesion value peaked at the rate of 2% fiber in the samples worked with 6 mm fiber length, the cohesion value peaked at the rate of 1.5% in the samples worked with 12 mm fiber length, and the cohesion value in the samples worked with 24 mm fiber length was 1% fiber. This is explained by the interaction between fiber-soil, fiber length, and fiber ratio (fiber density in the soil sample). It was concluded that basalt fiber could be used as an alternative in soil improvement studies.

BÖLÜM 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Barınma ihtiyacı, insanlığın varlığından bu yana daimi ihtiyaçlar arasında en ön sıralarda bulunmaktadır. İnsanlar bu ihtiyaçları doğrultusunda ilk başlarda doğada hazır halde bulunan yapılara sığınmış, daha sonrasında kolay ulaşılabilen basit dal ve sazlıklardan, taş, ahşap ve çamur gibi malzemelerden barınak inşa etmeye başlamıştır. Tahıl ürünlerinin besin ekonomisinde öneminin artmasıyla birlikte bu durum yapıların inşa biçimi ve planlamalarını etkilemiştir.

21. yüzyıla gelinmesiyle birlikte yapıların yükleri, karmaşık özellikleri artmış ve yapının yapıldığı zeminlerin önemi daha iyi kavranmıştır. Kozmopolit şehirlerde artan hızlı nüfus hızlı kentleşmeyi beraberinde getirmiş, yeraltı ve yerüstü yapıların yapılma zorunluluğu zeminleri kıymetli kılmıştır. Geoteknik açıdan yetersiz zeminlere yapı inşasının zorunlu olduğu durumlarda zeminleri farklı şekillerde iyileştirme yöntemlerine gidilmiştir. Farklı zayıf zemin türleri için kullanılacak olan zemin iyileştirme yöntemleri de farklılık gösterir. Örneğin; killi zeminlerde uzun vadede konsolidasyon oturmalarını azaltmak için kullanılan zemin iyileştirme metodu, kumlu zeminlerde sıvılaşma faktörünün etkisini azaltmak için kullanılan zemin iyileştirme yönteminden farklı olmaktadır. Yine çok eski zamanlardan günümüze malzemelere çekme dayanımı katmak için çeşitli metotlar uygulanmaktadır. Bu metotlardan biri, çamura saman lifleri katıp, kurummasını bekledikten sonra çekme dayanımında artış olmasıdır. Buradan hareketle zemin iyileştirme yöntemlerinden birinin zemine katkı malzemeleri katarak iyileşmesini sağlamak olduğu anlaşılmaktadır. Uzun yıllardan beri var olan katkı malzemesi ile zemin iyileştirme yöntemlerine yeni bir yaklaşım olarak bazalt fiber ilaveleri eklenmiştir. Zemine rastgele katılan fiberler bitki kökleri gibi görev görerek-kenetlenme ve sürtünme direnci oluşturur, zemin partiküllerinin hareketini engeller ve böylece taşıma kapasitesini artırır.

Bazalt fiberler, önceleri beton dayanımını artırma, kompozit malzemelerin güçlendirilmesi ve son olarak da zemin iyileştirme çalışmaları alanında inşaat mühendisliği uygulamalarında yer almaktadır.

Zeminin kayma mukavemeti; uygulanan yüklere karşı göçme oluşmadan karşı koyabileceği en büyük kayma gerilmesi olarak tarif edilir. Özellikle suya doymun alüvyonlu ortamlarda normal konsolide zeminler düşük kayma dirençleri ile geoteknik açıdan birçok problemlere neden olmaktadır. Bu tezin amacı killi zeminlerin içerisinde belirli boy ve oranlarda katılmış bazalt fiberin çalışılan killi zeminin kayma direnci üzerindeki etkisini incelemektir.

Bu araştırma çalışması kapsamında bazalt fiberin çevresel ve mühendislik özellikleri tanıtılmış, yüzeysel zemin iyileştirme metodları arasındaki olası yeri kesme kutusu deney sonuçları neticesinde değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamındaki tüm deneyler Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarında yürütülmüştür. Deneyisel çalışmanın ilk aşamasında zemin örneği üzerinde fiziksel deneyler tatbik edilmiş, sonrasında mekanik deneylere geçilmiştir. Doğal kil zemin numunesi bulamaç haline getirilip 7 günlük ön konsolidasyona tabi tutulduktan sonra deney hücresinden alınan 3 adet numune üzerinde farklı düşey gerilmeler altında kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Daha sonra 6 mm, 12 mm ve 24 mm boyundaki bazalt fiberler zemine ağırlıkça %0, %1, %1,5, %2 ve %2,5 oranlarında olmak üzere ilave edilmiştir. Bulamaç haline getirilen katkılı numuneler 7 günlük ön konsolidasyonun ardından deney hücresi içerisinde 3 adet numune alınmak kaydıyla farklı düşey gerilmeler altında kesme kutusu deneyine tabi tutulmuştur.

Yürütülen deneyler neticesinde doğal kilin özellikleri ve bazalt fiber katkılı hazırlanmış kil numunelerin kayma direnci parametrelerindeki değişim incelenmiştir.

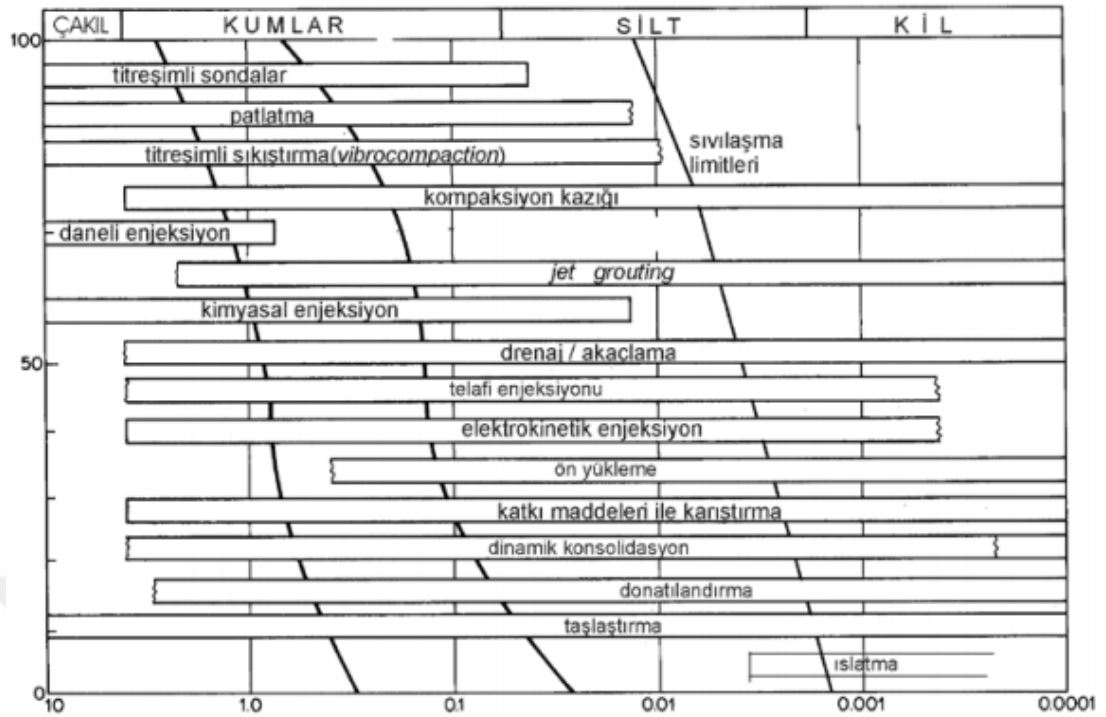
BÖLÜM 2. KATKI MALZEMELERİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRME VE FİBER KATKISI

2.1. Zemin İyileştirme

Dünya üzerinde nüfusun giderek artması ve metropol şehirlere yoğun talep, inşaat yapılarına duyulan ihtiyacın giderek artmasına neden olmaktadır. Bu da arazinin değerinin artmasını sağlamakta fakat yapıların yapılacağı zeminin cinsi arazi koşullarına göre geniş aralıkta değişkenlik gösterebilmektedir. Elverişli olmayan problemli zemini terk etmenin mümkün olmadığı durumlarda tasarımın zemin koşuluna uygun hale getirilmesi veya araziyi iyileştirme metotları değerlendirilir. Söz konusu iyileştirme metotları ile zeminlerin taşıma kapasitesinin artırılması, oturma problemlerine çözümler getirilmesi, şişme büzülme davranışının kontrol altına alınması ve sıvılaşmaya müsait zeminlerin dinamik yükler altında mukavemet değerinde artış sağlanması amaçlanmaktadır (Önalp ve Sert, 2016).

2.2. Zemin İyileştirme Yöntemleri

Her mühendislik yapısının olası zemin problemi ve durumu şahsına münhasırdır. Zemini oluşturan yapının dane büyüklüğüne (ince daneli ve iri daneli zeminler) göre yapılan uygulamalar, uygulama derinliğine göre yüzeysel ve derin zemin iyileştirme gibi çeşitli metotlar bulunmaktadır. Yüzeysel zemin iyileştirme yöntemi olarak drenaj, kompaksiyon, katkı malzemeleri ile iyileştirme akla gelirken, derin zemin iyileştirme yöntemi olarak ise ön yükleme, taş kolonlar, patlatma metodu, jet grout gibi çeşitli uygulamalar gelmektedir (Önalp ve Sert, 2016). Şekil 2.1.'de zemin iyileştirme yöntemlerinin dane boyutuna göre hangi tür zeminlerde daha uygun olduğuna işaret edilmektedir.



Şekil 2.1. Dane boyutuna göre zemin iyileştirme yöntemleri (Mitchell, 1981).

Mekanik yöntemlerin yanı sıra, kimyasal katkıları veya atık malzemelerin değerlendirilmesi ile zemine katkı malzemeleri eklenmesi yöntemiyle de zeminlerin iyileştirilmesi amaçlanır. Bu malzemeler bazen kimyasal katkıları, bazen atık ve yan ürünler, bazen de doğal-yapay fiber katkıları olarak çeşitli şekilde karşımıza çıkmaktadır. Katkı malzemeleri ile zemin iyileştirmesine yönelik çeşitli örnekler bir sonraki alt başlıkta verilmiştir.

2.3. Katkı Malzemesi ile Zemin İyileştirme Çalışmaları

2.3.1. Uçucu kül, kireç ve yüksek fırın cürufu katkısı

Uçucu kül, kömür yakılan termik santrallerde elektrik üretiminde kömürün toz halini alıp yanması sonucu bacalara takılan elektro mikron filtreler ile atmosfere salınımı engellenen mikron boyutundaki kül tanecikleridir. Uçucu küller endüstriyel atık malzeme olup geri kazandırılmaya elverişlidir. Yol yapımı, zemin iyileştirilmesi, dolgu-enjeksiyon işleri ve beton iyileştirmesinde kullanılmaktadır (Seals, 1977; Güler ve ark., 2005; Aruntaş, 2006).

Uçucu küllerin tek başına bağlayıcılık özelliği olmamasına rağmen başka bir malzeme ile birleştiğinde bağlayıcılık özelliği kazanan puzolanik bir malzeme olma rolü vardır (Bilici ve ark., 2020). Uçucu kül ilaveli zeminlerde kür süresinin artmasıyla dayanım artmaktadır. En az 28 günlük kür süresinin beklenmesi ve sonrasında dayanım değerlerinin ölçülmesi daha doğru sonuçlar vermektedir. Uçucu külün yapısının çimentolaşma özelliği kohezyon değerini artırırken, tanecik boyutlarının küresel yapısı da kayma direnci açısını arttırmaktadır (Çakır, 1999; Fırat ve Cömert, 2011).

Yılmaz (2016) uçucu kül ile zemin stabilizasyonunu araştırdığı deneysel çalışmasında ince daneli kil zemine %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında uçucu kül ekleyip numunelerini 7 ve 28 günlük kür süresine bırakmıştır. Kür süreleri sonunda 7 gün bekletilmiş katkılı zeminin doğal zemine göre tek eksenli basınç dayanımında artış gösterdiği, en başarılı sonucun ise katkılı numunenin 28 gün kür süresi neticesinde %25 oranında uçucu kül ilavesinin olduğu zemin numunesinde gözlemlenmiştir. Çalışmalar neticesinde yapay puzolan olan uçucu kül katkısının zemin iyileştirmelerine olumlu katkı sağladığı belirlenmiştir.

Diallo ve Ünsever (2019) uçucu kül ve kireç katkısının zemin iyileştirmesine olan etkisini araştırmış ve katkılı numuneyi Atterberg Limitleri, kompaksiyon ve serbest basma dayanımı deneylerine tabi tutmuştur. Yüksek plastisiteli kil numunesine %2 oranında kireç ve %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında uçucu kül ilave etmiştir. Killi numuneye kireç ve uçucu kül katkısı sonucu likit limit ve plastisite indisinde azalma gözlenirken, plastik limitte artış gözlemlenmiştir. %2 kireç ve %15'ten fazla uçucu kül ilavesi sonucu zemin plastikliğini tamamen kaybetmiştir. %2 kireç ve %0 ile %30 arası uçucu kül ilavesi sonucu maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri $1,53 \text{ t/m}^3$ 'den $1,42 \text{ t/m}^3$ 'e, optimum su muhtevası değerleri %23,9'dan %18,1'e düşmüştür. Kireç ve uçucu kül katkılı hazırlanan numuneler 3,7 ve 28 günlük kür sürelerine tabi tutulmuş, maksimum serbest basma dayanım değerine 28 günlük kür süresi sonunda %25 uçucu kül ve %2 kireç oranında ulaşılmıştır. Çalışmalar kireç ve uçucu kül katkısının zemin iyileştirmesinde etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir.

Yüksek fırın cürufu, demir çelik üretiminin bir yan maddesi olarak ortaya çıkan atık bir malzemedir. Pozolanik bir malzeme olup çimento ile benzer özellikler göstermektedir ve zemin iyileştirme katkısı olarak kullanılır (Bilge, 2011). Yüksek miktarda yan ürün olarak ortaya çıkan yüksek fırın cürufunun üzerinde yapılan çalışmalar neticesinde katkı malzemesi olarak kullanımı sabitlenmiş bir düşünce haline gelmiştir. Böylelikle yüksek fırın cürufu “atık” malzeme olmaktan çıkıp güncel durumda bir “ürün” olarak değerlendirilmektedir (Bilgen ve ark., 2012).

Develioğlu ve Pulat (2018) yüksek fırın cürufunun zeminlerin geoteknik özellikleri ve taşıma kapasitesi performansını inceledikleri çalışmada yüksek fırın cürufunu iri daneli (9,5 mm) ve ince daneli (4,75 mm) olarak ikiye ayırmışlardır. Çalışmalar sonucunda ince daneye sahip örneğin iri daneye sahip numuneye oranla taşıma kapasitesinde artma olduğu görülmüştür. Araştırmacılar, sıkıştırmanın Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) değeri üzerine etkisini araştırmak için numuneleri modifiye ve standart Proktor enerjisi ile sıkıştırmışlardır. Beklendiği gibi, modifiye Proktor enerjisi ile sıkıştırılan numunelerin CBR değerinin standart Proktor ile sıkıştırılanlara göre en az 2 kat daha fazla olduğu sonucuna ulaşmış ve deniz suyu katkılı numunelerin musluk suyu katkısına göre CBR değerini %17 arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Bilici ve ark. (2020) kil zeminin dayanımı üzerinde uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun katkısını incelemişlerdir. Düşük plastisiteli kil zemine, pozolanik reaksiyonu hızlandırmak için %3 oranında kireç oranı sabit şekilde katılırken, %3, %6, %9, %12 ve %15 oranlarında uçucu kül ve %3, %6, %9 ve %12 oranlarında da yüksek fırın cürufu katılmıştır. Hazırlanan numuneler kür süresiz, 7 gün ve 28 gün kür süresi sonunda serbest basma deneyine tabi tutulmuştur. 28 günlük kür süresi sonunda uçucu kül ile hazırlanan zeminlerin serbest basma dayanımındaki maksimum artış %3 kireç + %12 uçucu kül oranında olurken, yüksek fırın cürufu katkılı numune de ise %3 kireç + %9 yüksek fırın cürufu oranında olmuştur. Katkısız numuneye göre her iki ilave katkılı zeminin serbest basma dayanımı yüksek iken, uçucu kül katkılı numunenin ise 28 günlük kür sonunda neredeyse 2 kat daha fazla dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Bu durumun nedeni olarak; uçucu külün pozolanik özelliğinin yüksek fırın cürufuna göre daha fazla olmasını göstermişlerdir.

2.3.2. Mermer tozu ve pomza katkısı

Mermer blokların işlenmesi sonucu oluşan ve çökeltme havuzlarında biriken yan maddeye mermer tozu denilmektedir. Mermer tozu yapısında yüksek oranda kalsiyum oksit (CaO) bulundurması sebebiyle kireçle benzerlik gösterir ve parçacık boyutunun çok küçük olması nedeniyle de ince daneli zeminlerin iyileştirilmesinde kullanımı öngörülür. Mermer tozunun kullanımı endüstriyel açıdan kazanç sağladığı kadar çevre problemlerinin de önüne geçer (Zorluer ve Usta, 2003; Görgün ve Ural, 2015; Çitoğlu ve Bayraktar, 2018).

Görgün ve Ural (2015) kil zemin numunesine %10 ve %20 oranlarında atık mermer tozu ilave edip optimum su muhtevasında hazırladıkları numuneleri 0 ve 7 günlük kür süresine bırakmışlardır. Ardından yapılan serbest basma deneyleri neticesinde en yüksek mukavemetin 7 gün kür süreli %20 mermer tozu katkılı kil numunesinde olduğu gözlemlenmiştir. Mermer tozu katkısının ve kür süresinin numunenin dayanımını olumlu yönde etkilediği ve atık olan mermer tozunun kullanımı neticesinde çevreye verilen zararın azaltılması, ekonomik bir katkı maddesi olması yönünden de zemin iyileştirilmesinde kullanımı uygun bulunmuştur.

Zorluer ve Usta (2003) atık mermer tozunu %0, %1, %3, %5 ve %7 oranlarında kil zemine ilave ederek oluşturulan numuneler üzerinde şişme deneyleri yapmışlardır. Mermer tozu ilavesindeki artışın numunenin şişme yüzdesinde azalma meydana getirdiği, en az şişme yüzdesinin %5 mermer tozu katkılı numunelerde olduğu görülmüştür. %5'ten sonra şişme yüzdesinde tekrar artış meydana gelmiş, bu artışın ise mermer tozu katkısının numunede daha sıkı bir yapı oluşturmamasından kaynaklandığı yorumlanmıştır. Bu yorum daha önceki çalışmalarda sıklığı daha az olan zeminin, sıklığı daha fazla olan zemine göre daha az şişme göstermesi üzerine yapılmıştır. Araştırmacılar mermer tozunun zeminlerin şişme potansiyelini etkilemesi üzerine zemin iyileştirilmesinde kullanılabilir bir malzeme olduğu sonucuna varmışlardır.

Çimen ve ark. (2010) pomza ve mermer tozu katkılı yüksek plastisiteli kilin mühendislik özelliklerini araştırmışlardır. Numuneye katılacak katkı ilavelerini sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25, %30 ve %35 oranlarında pomza, %2, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında mermer tozu olarak belirlemişlerdir. Numuneler üzerinde serbest basınç dayanımı, kıvam limitleri ve standart kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Numuneye plastik olmayan bir malzeme olan mermer tozu ilavesiyle kıvam limitlerinde azalma olduğu gözlemlenmiştir. Kompaksiyon deneyleri sonunda pomza ve mermer tozu katkısı ile maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde artma olduğu görülmüştür. Deneyler sırasında pomza miktarının artmasıyla deney numunelerinin daha iyi karıştığı, deney şartlarının kolaylaştığı fakat mermer tozu miktarının artmasıyla tersi durum olduğu gözlemlenmiştir. Serbest basınç deneyleri sonucunda pomza miktarının artmasıyla kil numunesinin basınç değerlerinin genel olarak arttığı, bu basınç değerlerindeki artışın da pomza içerisinde bulunan kalsiyum silikat hidrat kristalleşmesinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Araştırmacılar, ideal pomza karışım oranının %25-%30 olduğuna karar vermişlerdir. Mermer tozu ilavesinde ise en yüksek serbest basınç değerinin %5 katkı oranında elde edildiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak pomza ve mermer tozu ilavesinin killi zeminde zemin iyileştirmesine katkı sağladığı anlaşılmaktadır.

2.3.3. Çelikhane cürufu katkısı

Endüstriyel bir atık olan çelikhane cürufu çelik üretiminde büyük miktarlarda ortaya çıkan bir ara üründür. Yapısında ciddi oranda CaO bulundurması yönüyle kireç ve uçucu kül ile benzerlik gösterir. Yüksek fırın cürufuna oranla ise daha sert ve sıkıdır (Bilgen ve ark., 2012; Türedi ve ark., 2017).

Türedi ve ark. (2017) çelikhane cürufu (Basic oxygen furnace slag-BOS) katkısının killi zeminin CBR değerine etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada killi zemine %0, %5, %10, %15, %20, %50, %75 ve %100 oranlarında çelikhane cürufu katarak 2,5 mm ve 5 mm oturmalara karşılık gelen CBR değerini karşılaştırmışlardır. Saf kil numunesinin 2,5 ve 5 mm oturmaya karşılık gelen CBR değerleri sırasıyla 1,5 ve 2,5 iken, çelikhane cürufu katkılı numunenin CBR değerleri ise sırasıyla 5 ve 7'ye

yükselmiştir. Saf kil numunesi ilk durumda zayıf zemin olarak değerlendirilirken, katkılı şekilde ise az zayıf-orta zemin sınıfına yükselmiştir. En iyi CBR değerine ise %30-%40 katkılı zeminlerde ulaşılabileceği sonucuna varılmıştır.

Bilgen ve ark. (2012) kil zemine çelikhane cürufu katkısı ilave etmiş ve aynı zamanda karışıma kireç etkisini de araştırmışlardır. Killere katkı olarak en uygun kireç miktarının belirlenmesi için asidik denge pH yöntemi uygulanmıştır. 12,4 standart pH değerini veren kireç miktarının %5 olduğu denemeler sonucu belirlenmiş, 1:1,5 oranında yani 1,5 kirece 1 çelikhane cürufu kullanılmıştır. Optimum su muhtevalarında hazırlanan numuneler serbest basınç deneyleri için hazırlanmış ve hazırlandığı dakika içerisinde, 1, 7 ve 28 gün kür süresi sonunda deneylere tabi tutulmuştur. Saf kil numunesinin serbest basınç dayanım değeri 279 kPa olup bu basınç altında %15 deformasyona uğramaktadır. Katkı malzemeleri eklenmesiyle 28 günlük kür süresi sonunda %3,33 BOS katkılı numunenin serbest basınç dayanımı 960 kPa'a, %5 kireç katkılı numunenin dayanım değeri ise 2700 kPa değerine ulaşmıştır. Maksimum serbest basınç dayanım değerine ise %5 kireç ve %3,33 BOS katkısının aynı anda eklenmesi ile ulaşılmış ve birim şekil değiştirme değeri de %2'ye düşmüştür. Bununla birlikte %5 kireç, %7,5 BOS katkılı numunenin dayanım değerinin ise 2900 kPa olduğu gözlemlenmiştir. Saf kil numunesinin 28 günlük kür süresi sonunda CBR değeri 6, 3,33 BOS katkılı numunenin CBR değeri 21, %5 kireç ve %3,33 BOS katkılı numunenin CBR değerinin ise 23 kat artarak 135'e ulaştığı görülmüştür. Fakat %5 ve %7,5 BOS katkılı numunenin ise CBR değeri 120'ye düşmüştür. Bu deneyler sonucunda kireç ve BOS katkısının artışının dayanım ve CBR değerlerinde önce artışa daha sonra azalışa sebep olduğu anlaşılmıştır. Bu sonuçlara göre kireç ve BOS kullanımında optimum bir oranın olduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışma için optimum oran %5 kireç + %3,3 BOS katkısıdır. Sonuç olarak; literatürden görüleceği üzere kil zeminlerin iyileştirmesinde kireç ve BOS katkısının bir diğer seçenek olduğu anlaşılmaktadır.

2.3.4. Cam atık çamuru katkısı

Mahmutoğlu ve Bağrıaçık (2020) zeminlerin iyileştirilmesinde atık bir malzeme olan cam atığı çamurunun etkisini araştırmışlardır. Cam atığı çamuru, cam üretimi yapan fabrikaların ön atığıdır, cam hammaddesinin işlenmesi sırasında ortaya çıkar ve sürekli boşaltımı çevre kirliliğine sebep olur. Araştırmacılar çalışmalarında cam atık çamuru ve çimento katkısı ile killi zeminin donma çözülme davranışının değişimini incelemişlerdir. Kil zemine katılan katkı maddeleri sırası ile şu şekildedir; %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında cam atığı çamuru, %2, %4, %6 ve %8 oranlarında çimentodur. Donma çözülme çevrimleri sonunda saf kil numunesinin serbest basınç dayanımında azalma olduğu fakat atık çamur katkısı oranı arttıkça serbest basınç dayanım değerinde artmalar meydana geldiği gözlemlenmiştir. Donma çözülme çevrim sayısı arttıkça cam atık çamuru katkılı zeminlerin dayanımında azalma olduğu gözlemlense de cam atık çamur katkısı killi zemini daha kararlı bir hale getirmiştir. Bu kararlılık cam atık çamuru yapısında bulunan yüksek orandaki SiO_2 ve CaO 'dan kaynaklanabilir. Söz konusu oranlara çimento katkısı ilavesi ile daha yüksek dayanım değerlerine ulaşılmıştır. Ayrıca cam atık çamuru ve çimento ilavesi ile numunelerin şişme potansiyellerinde düşüş meydana geldiği görülmüştür. Cam atık çamuru katkısının saf kil numunesine göre zeminin konsolidasyon oturmalarında iyileştirmeler sağladığı, çimento katkısı ilavesiyle de oturmaların 4 mm'den 1,5 mm mertebelerine düştüğü gözlemlenmiştir. Literatürde cam atık çamuru katkısı ile zemin iyileştirme çalışmaları kısıtlı olsa da bu çalışma kapsamında cam atık çamuru ve kireç katkısının zeminin konsolidasyon parametreleri, mukavemet ve şişme değerlerinde iyileştirmeler meydana getirdiği sonucuna varılmıştır.

2.3.5. Atık granit katkısı

Tezgah ve döşeme kaplamalarında kullanılan granitin çeşitli sebeplerle zayıfla uğraması sonucu oluşan granit kırıklarının ekonomik ve çevresel olarak değerlendirilmesi sonucu üzerine Hassan ve ark. (2015) bir kilin atık granit kırığı ile iyileştirilmesine dair çalışma yapmışlardır.

Yapılan çalışmada kil zemine granit kırıkları %0, %5, %10, %15, %25 ve %35 oranlarında katılmıştır. Hazırlanan numuneler kompaksiyon ve serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Kompaksiyon deneyleri sonucu granit kırığı katkısının artması ile optimum su muhtevasında azalma, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde artma olduğu görülmüştür. Su muhtevasındaki azalışın granit kırıklarının daha düşük su emme özelliğinin olmasından, kuru birim hacim ağırlıktaki artışın ise granit kırıklarının özgül ağırlığının kile göre daha yüksek olmasından kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır. Katkılı numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneylerine göre atık granit katkısının artışı serbest basınç dayanımını artırmıştır. En yüksek dayanım miktarı ise %35 atık granit oranında olmuştur. Bununla birlikte literatürde daha önceki çalışmalar ve yazarın yorumu göz önünde tutulduğunda granit kırığı miktarındaki fazla artışın zemin-granit kırığı arasındaki bağlantıyı olumsuz etkileyebileceği ve dayanım değerini düşürebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

2.3.6. Atık lastik katkısı

Zemine karıştırılarak zemin özelliklerini iyileştirmede kullanılan bir diğer katkı malzemesi de atık lastiklerdir. Atıl durumdaki atık lastiklerin çevreye verdiği zararları minimuma indirmek ve katkı malzemesi olarak kullanımlarının ekonomik oluşu nedeniyle zemin iyileştirme ve dolgu çalışmalarında tercih edilmek istenmektedir.

Karaman ve Ecemiş (2017) kum zemine belirli oranlarda kattıkları kırpıntılı lastik parçalarının sıvılaşma potansiyeline olan etkisini sarsma tablası deneyi ile incelemiş, lastik kırpıntılı kum karışımının sıvılaşma direncinin temiz kuma göre daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir.

Erginer ve ark. (2019) ayakkabı sanayisinde atık lastik olarak bilinen poliüretan malzemesini kötü derecelendirilmiş kum zemine ilave ederek CBR üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapılan CBR deneyleri sonunda, katkı malzemesi olan atık lastiğin kötü derecelendirilmiş kum zemine %20 oranına kadar katılmasıyla CBR değerinin arttığı, %25 ve üzeri değerlerde ise zemin özelliklerinin giderek kötüleştiği sonucuna ulaşmışlardır.

Akbulut ve ark. (2007) yüksek plastisiteli killi zemin içerisine atık hurda lastik kırıntısı, polietilen ve polipropilen lif katarak temiz kil ve katkılı kil üzerine, kesme kutusu, serbest basma (Unconfined Compression Strength-UCS) ve rezonans frekansı deneyleri yapmışlardır. Bu deneyler sonucunda %2'ye kadar atık lastik değerinin katkısı, kilin serbest basma dayanımını arttırmış, bu orandan sonra ise düşüşe sebep olmuştur. Polietilen ve polipropilen liflerinin yoğunluğu ve boyu da serbest basma dayanımını artırmıştır. Genel olarak sentetik liflerin ve atık lastik kırıntısının kilin kohezyon değerini artırdığı sonucuna varılmış ve maksimum kohezyon değeri 10 mm uzunluğundaki fiberlerde gözlemlenmiştir. Kayma direnci açısından düzgün olmayan bir artışa rastlanmıştır. Sonuç olarak araştırmacılar bu katkı malzemelerinin zeminin iyileşmesine etki ettiğini gözlemlemiş ve atık malzemeler olmalarından dolayı da potansiyel olarak iyileştirme giderlerini düşürebileceğine kanaat getirmişlerdir.

Edinçliler ve Ayhan (2010) kum zemin içerisine granül lastik ve lif şekilli kırıntı lastik olmak üzere iki farklı üretim tipi lastik katıp zemini kesme kutusu deneyine tabi tutmuşlardır. Boyu 10-50 mm, kalınlığı 4-5 mm olan lif şekilli kırıntı lastiğin %20 oranında zemine ilavesiyle maksimum kesme gerilmesi değerini verdiği, bu değerden sonra ise kesme mukavemetinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Bu çalışma neticesinde lif malzemesinin en/boy oranının artmasıyla kesme mukavemeti değerinin de arttığı, daha uzun liflerin zeminle daha fazla temas alanı oluşturacağı ve bu liflerin de kesmeye karşı direnen mini ankrajlar gibi düşünülebileceğini öne sürmüşlerdir.

Yarbaşı (2018) düşük plastisiteli killi zemine atık lastik ve mermer tozu ekleyerek dayanım özelliklerini araştırmıştır. Araştırmacı kil numunesine %0,5, %1 ve %2 oranında atık lastik katarken mermer tozu oranını %5, %10, %15 ve %20 değerlerinde tutmuştur. Hazırladığı numuneleri 3 saat, 1, 7 ve 28 gün kür süresinde +21°C'de bekletmiş, ardından donma çözülme sonrası serbest basınç dayanımı deneyleri yapmıştır. %5 mermer tozu katkılı kil numunesinin 28 günlük kür sonunda en yüksek serbest basma dayanım değerini verdiği gözlemlenmiştir. Mermer yapısındaki yüksek oranda CaO sebebiyle kireç ile benzerlik göstermektedir. Numuneye atık lastikler ise 1,18 mm, 2 mm ve 3,18 mm boyunda ve %0,5, %1 ve %2 oranlarında olmak üzere üç farklı boy ve oranda ilave edilmiştir. En yüksek serbest basma dayanımının ise %0,5

oranında 2 mm boyunda atık lastik katkılı numunelerde olduğu gözlemlenmiştir. Fazla büyük ya da fazla küçük lastik boyutu parçaları numune ile güçlü bağlar kuramamakta, bu da zayıf zonların oluşmasına neden olmaktadır. Bu yüzden optimum boyun seçilmesi önem arz etmektedir. Atık lastik (%0,5, 2 mm) ve mermer tozu (%5) optimum oranlarının birlikte kullanıldığı kil numunesinde ise donma çözülme dayanım kaybının diğer numunelerin kayıplarına göre daha az olduğu gözlemlenmiştir. Katkı malzemesi ilavelerinin temiz zemine oranla numuneye mukavemet kazandırdığı ve donma çözülme sonrası dayanım kaybını azalttığı için zemin iyileştirilmelerinde kullanılabilirliği sonucuna ulaşılmıştır.

2.3.7. Sentetik akışkan ve fiber katkısı

Donma çözünmeye maruz kalan zeminlerin dayanımının önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Soğuk bölgelerde, donma neticesinde bünyesinde su bulunan zeminler hacimlerini %9 oranında artırır ve çözünme sonrası zemin partikülleri arasında büyük boşluklar meydana gelir. Bu da zeminin kesme direncini ve stabilizasyonunu düşürür. Literatürde sentetik akışkan katkısı ile zemin iyileştirmeye dair çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmektedir.

Hazırbaşa ve Güllü (2010) geofiber (polipropilen) ve sentetik akışkan katkısı ile ince daneli zeminler üzerinde CBR ve donma-çözünme deneyleri yapmışlardır. Araştırmacılar doymuş ve doymamış zemin numunelerine sadece geofiber, sadece sentetik akışkan ve geofiber ve sentetik akışkanı birlikte kattıkları çalışmalarında şu sonuçlara ulaşmışlardır.

1. Sadece geofiber katkısının hem doymuş hem de doymamış zeminlerde CBR değerini artırdığı gözlemlenmiştir.
2. %4 oranına kadar sentetik akışkan katkısı ile CBR değerinin arttığı, %4 - %8 oranı arasında CBR değerinin neredeyse sabit kaldığı ve %8 oranında sentetik akışkan katkısı ile CBR değerinde düşüş meydana geldiği gözlemlenmiş, optimum sentetik akışkan oranının %4 olduğu kanısına varılmıştır.

3. %0,5 geofiber, %4 sentetik akışkan ve %6 su katkısı ile elde edilen karışımın önemli ölçüde CBR değerini artırdığı ve siltli zeminin iyileştirilmesinde kullanılacak optimum değerin bu olduğu sonucuna varılmıştır.
4. Donma çözülme testleri, geofiber ve sentetik akışkanın donma çözülme etkisine karşı etkili olduklarını ve en iyi performansı doymamış zeminlerde gösterdiklerini ortaya çıkarmıştır.
5. Deneyler neticesinde, sadece sentetik fiber katkısının doymamış zeminlerde etkili ve yeterli olabileceği görülmüş fakat doymuş zeminler üzerinde sentetik fiberin hidrofobik özelliğinden dolayı etkili olmadığı sonucuna varılmıştır.

2.3.8. Jüt, çelik fiber ve kireç katkısı

Kireç katkısı ile zemin özelliklerini iyileştirme başlıca zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olup, zeminin karakteristik birçok özelliğini güçlendirir. Jüt lifleri, 2,5 metreye kadar uzayan jüt bitkisinin lifli kabuğundan elde edilir. Jüt fiberler çevre dostu, güçlü ve organik fiberler olup zemin stabilizasyonları, filtrasyon ve drenaj gibi durumlarda kullanılır (URL-1). Çelik fiberlerin de zemin iyileştirmede etkili olduğu fakat bu iyileştirmenin diğer fiberlere göre daha fazla araştırma gerektirdiği bilinmektedir (Ghazavi ve Roustae, 2010).

Güllü ve Khudir (2014) düşük plastisiteli siltli zemine jüt, çelik ve kireç ilave ederek elde ettiği iyileştirilmiş zeminin serbest basınç dayanımı üzerine donma çözülme etkisini araştırmışlardır. Şekil 2.2.'de iyileştirme malzemesi olarak kullanılan jüt fiber ve çelik fiberin görseli sunulmuştur.



Şekil 2.2. Jüt ve çelik fiber örnekleri (Güllü ve Khudir, 2014).

Katkı malzemelerinin ayrı ayrı zeminin serbest basınç dayanımını artırdığı fakat en iyi artış değerinin olduğu dozaj kombinasyonunun %4 kireç + %0,75 jüt fiber + %0,25 çelik fiber olduğu gözlemlenmiştir. Bu kombinasyonda, temiz zeminin serbest basınç dayanımının donma çözülme çevriminin olmadığı durumda 220 kPa'dan 1330 kPa'a arttığı, bir donma çözülme çevrimi için 205 kPa'dan 1300 kPa'a arttığı, iki donma çözülme çevrimi için 156 kPa'dan 1100 kPa'a arttığı ve üç donma çözülme çevrimi için 114 kPa'dan 900 kPa'a arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Gerilme-şekil değiştirme tepkilerine gelindiğinde, sadece jüt fiber katkısının pik gerilme, pekleşme ve süneklik açısından tüm donma çözülme çevrimlerinde çelik fiber ve kireçten daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

2.4. Fiber Katkısı ile Zemin İyileştirme

Bir boyutu diğer boyutuna göre oldukça fazla olan malzemeye lif (elyaf, fiber) denilmektedir. Fiberler uzunluğa, esnekliğe, bükülebilirliğe ve dayanıma sahip olan malzemelerden olup doğal kaynaklardan elde edilebilmesinin yanı sıra insan üretimi ile de elde edilebilirler (Aral, 2006). Tablo 2.1.'de doğal ve yapay fiberlere ait örnekler, Tablo 2.2.'de ise değişik fiber çeşitlerine ait tipik özellikler verilmiştir. Fiber ile zemin iyileştirme bitki köklerinin zemine yaptığı etki gibi düşünülebilir. Bitki kökleri doğal şevlerin stabilitesini ve kesme kuvvetini artırır. Fiberler zemin ile iç içe geçerek sürtünme kuvveti oluşturup zeminin hareketine etki eder ve bu da zeminlerin taşıma kapasitesini artırır (Rajagopal, 2017).

Tablo 2.1. Fiber çeşitleri (Aral, 2006; Hejazi ve ark., 2012).

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	Çelik
Keten, Kenevir	-	-	Naylon
Saman	-	-	Polipropilen (PP)
Bambu	-	-	Polyester (PET)
Şeker kamışı	-	-	Polietilen (PE)
Ahşap (Selüloz)	-	-	Polivinil (PVA)
Akwara	-	-	Poliüretan
			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_c (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

Fiberler tüm zemin tipleri için faydalı olup esnekliği, sismik performansı artırırken aynı zamanda erozyon kontrolüne ve oturmaların azaltılmasına katkı sağlarlar. Çimento, kireç ve diğer kimyasal katkı malzemelerine nazaran hava koşullarından etkilenmezler. Fiber ile güçlendirilmiş zeminler daha çok zemin ve fiberin etkileşim özelliklerinden etkilenir. Zemin içindeki fiber oranı, fiberin yoğunluğu, en boy oranı, fiberin uzunluğu ve zemin ile fiber arasındaki sürtünme fiber-zemin ilişkisi açısından önemlidir (Rajagopal, 2017).

2.4.1. Doğal fiber katkısı

Doğal fiberler düşük yoğunluğa sahip olması, kolay ulaşılabilir ve ekonomik olması yönünden avantajlara sahiptir. Aynı zamanda biyolojik olarak parçalanabilir olması açısından da çevre dostudur.

Antik zamanlardan bu yana gevrek malzemelerin donatılandırılmasında kullanılmakta olup, at kılının duvar harcı veya sıva yapımında kullanımı ya da samanın güneş ışığında pişirilmiş tuğla yapımında kullanımı bunlara örnek verilebilir (Ndepete, 2017).

2.4.1.1. Hindistan cevizi kabuğu katkısı

Hindistan cevizi kabuğu fiberleri biyolojik olarak parçalanan çevre dostu bir materyal olmasının yanı sıra içerdiği lignin içeriği ile (yaklaşık olarak %46) jüt ve pamuk gibi fiberlere göre çok daha kuvvetlidir. Hindistan cevizi lifleri diğer doğal liflere göre çok daha uzun ömürlü olup, kırsal yollarda ve zemin iyileştirilmesinde kullanılması mümkündür. Bu liflerin varlığı killi zeminin sıkılığı ve mukavemetini artırırken CBR değerini de önemli ölçüde yükseltir (Rajagopal, 2017).

Junior ve ark. (2019) kısa hindistan cevizi liflerini tropikal killi zemine %0, %0,5, %1 ve %2 oranlarında katarak çeşitli deneyler yürütmüşlerdir. Kesme deneyi için en iyi sonuç %1 hindistan cevizi katkılı numunede görülmüş olup, kompaksiyon deneyleri sonucunda fiber oranının artması ile optimum su muhtevasında artış, maksimum kuru birim hacim ağırlıkta ise azalış meydana gelmiştir. %1 oranının altındaki fiber katkılı karışımlarda hidrolik iletkenlikte bir değişim gözlemlenmezken (10^{-7} cm/sn), fiber içeriğinin artması ile birlikte hidrolik iletkenlikte neredeyse bir magnitud artış meydana gelmiştir.

Soundara ve Kumar (2015) killi zemine hindistan cevizi lifi ve polipropilen fiber katarak zemine olan etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada fiberler kuru zemin ağırlığının %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında olacak şekilde zemine ayrı ayrı katılmıştır. Fiberlerin katılması ile numunede optimum su muhtevası artmış, maksimum kuru birim hacim ağırlık azalmıştır. Ayrı ayrı katılan her iki fiber katkısı neticesinde zeminin CBR değerinde artış gözlemlenmiştir ve bu artış normal zeminin CBR değerinin 2 katı kadardır. Sonuçta %1 fiber katkısının iyileştirme metotlarında kullanılabilirliği önerilmiştir.

2.4.1.2. Keten fiber katkısı

Keten doğal olduğu için maliyeti düşük olan, yüksek çekme dayanımının yanında yüksek elastisite modülüne de sahip olan bir fiber türüdür (Ndepete, 2017; Alp, 2019).

Literatürde limitli sayıda keten fiber katkısına dair çalışmalar bulunmaktadır. Ayininuola ve Udoh (2018) keten fiber katkılı zeminlerin geoteknik özelliklerini araştırmışlardır. Kötü derecelenmiş 2 farklı kum zemine %0, %0,3, %0,6, %0,9, %1,2 ve %1,6 oranlarında keten fiber takviyesi yapılmış ve zemin üzerinde kıvam limitleri, kompaksiyon, CBR ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Zemine eklenen fiber oranı arttıkça optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. CBR ve serbest basma dayanım değeri ise temiz kum numunelerine göre artış göstermiş, optimum artışın ise %1,2 keten fiber oranında olduğu görülmüştür. Çalışma keten fiberlerin zemin iyileştirilmesinde kullanılabileceğinin bir göstergesidir.

Segetin ve ark. (2007) keten fiber ile yaptıkları çalışmada; 70 mm ve 85 mm uzunluğundaki keten fiberleri zemine %0,6 ve %0,8 oranında ilave etmişler ve bu uygulamanın zemin dayanımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Keten fiber oranının artmasıyla birlikte zeminin sünekliliğinde önemli bir iyileşme olduğu fakat bu iyileşmenin fiber boy ve oranından ziyade karıştırma yöntemi ile ilgili olduğunu gözlemlemişlerdir. Manuel karıştırma yöntemi için 85 mm fiber uzunluğunun üst limit olurken fiber oranının da %0,8 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Fiber oranının artması ile dayanımın arttığı görülürken, karıştırmanın ise giderek zorlaştığı gözlemlenmiştir. Uygun fiber oranının dayanım ve karıştırma yöntemi açısından %0,6 olduğu ve bu oran aşağısındaki numunelerin gevrek davranış sergilediği görülmüştür.

2.4.1.3. Jüt fiber katkısı

Jüt lifi elde edilen bitkiler (*Corchorus olitorius*, *Corchorus capsularis*, *Ihlamurgiller-tiliaceae*) daha çok tropik bölgelerde Hindistan, Tayland ve Çin'de yetişir. Bu bitkilerin uzunlukları 2,4 m, sap çapları ise 25 mm'den az olur ve çekme gerilmesine

karşı oldukça dayanıklıdır. Geleneksel olarak bu lifler el ile ayrılıp kurutulsa da son zamanlarda mekanik aletlerin de bu işlem için geliştirildiği görülmektedir. Daha çok halat, çuval, giysi ve çanta yapımında kullanılır (Aral, 2006). Jüt fiberler kuru ağırlıklarının yaklaşık olarak %500 kadarında su absorbe ettiklerinden doğal ve insan yapımı fiberlere nazaran en yüksek hidroskopik özelliklere sahip olan fiberdir. Doğal fiber kullanımı zeminlerin çekme ve kesme dayanımlarında artışlar meydana getirirken aynı zamanda zemin özelliklerinin de iyileşmesine katkı sağlar (Carmel ve Vinu, 2015; Sharma ve ark., 2017).

Sharma ve ark. (2017) iyi derecelenmiş kum zemine yaklaşık olarak 20 mm uzunluğundaki jüt fiberleri %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranlarında ilave etmiş ve çeşitli deneylere tabi tutmuşlardır. Standart kompaksiyon deneyi sonucunda jüt fiber oranının artması ile birlikte kuru birim hacim ağırlıkta artış gözlemlenirken maksimum değer %1 jüt fiber oranında olduğu gözlemlenmiştir. Jüt fiber oranının artmasıyla %1,5 fiber oranına kadar serbest basınç dayanımında artış meydana geldiği ve maksimum serbest basınç değerinin %1,5 fiber oranında 3,82 kg/cm² olarak ölçüldüğü görülmüştür. Jüt fiberin zemin iyileştirmesine katkıda bulunduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Carmel ve Vinu (2015) yumuşak kil zemine kireç ve jüt fiber ekleyerek zemin özelliklerinin performansını incelemişlerdir. Kirecin yüksek plastisiteli zeminlere katılarak kimyasal reaksiyondan ötürü zeminin özelliklerini iyileştirdiği bilinmektedir. Bu çalışmada kireç katkısı ile zeminde meydana gelen gevrekliği azaltmak için ilave olarak doğal ve kaplanmış jüt fiberler kullanılmıştır. Araştırmacılar, jüt fiber boy ve çaplarını farklı tutmuştur. Belirlenen optimum kireç katkısına (yapılan deneyler sonucu %6 olarak belirlenmiştir) 20 ve 40 mm boyunda, 3 ve 5 mm çapında jüt fiberler %2, %4, %6 ve %8 oranlarında eklenmiştir. Jüt fiber ve kireç katkısı sonunda temiz numuneye göre serbest basınç dayanımında %13 artış meydana gelmiştir. Ayrıca kireç katkısı ile numunede meydana gelen puzolanik etki ve kür süresinin önemi gözlemlenmiş, fiber boyu ve çapının artmasıyla serbest basma dayanımında artış meydana geldiği, bununla iyileştirmeye katkı sağladığı sonucuna varılmıştır.

2.4.2. Yapay fiber katkısı

Yapay fiberler, üretiminde kullanılacak hammaddenin sıvı ya da yarı sıvı hale getirilip ıslak çekme ya da kuru çekme gibi işlemler uygulanarak lif haline getirilmesi ile üretilirler (Aral, 2006).

2.4.2.1. Polipropilen (PP) fiber katkısı

Polipropilen fiberler günümüzde zeminin dayanım özelliklerini iyileştirmek, büzülme davranışını azaltmak, kimyasal ve biyolojik bozulmaların üstesinden gelmek için kullanılmaktadır (Hejazi ve ark., 2012).

Eskişar ve Altun (2015) siltli zemine 6 mm ve 12 mm uzunluğunda polipropilen fiber ilave ederek zeminin mekanik davranışını serbest basınç deneyleri ile ölçmüşlerdir. Fiber uzunluğunun ve boyunun zeminin mukavemet değerini artırdığı, en iyi mukavemet değerinin 12 mm uzunluğunda ve %0,75 fiber oranında olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Fiber uzunluğundan ziyade fiber oranının, donma çözülme maruz kalmış veyahut kalmamış zeminlerde donma çözülme etkilerini azalttığı ve/veya serbest basınç mukavemetini artırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca fiber katkısı zeminin sünekliğini artırmıştır.

Kış mevsimini geçiren zeminler sene içerisinde en az bir kez donma çözülme döngüsüne maruz kalırlar. Bu döngü yapıları, yolları, demiryollarını ve boru hatlarını etkiler (Zaimoğlu, 2010). Güney ve ark. (2006) zemin iyileştirme uygulamalarında iyileştirme materyalinin mevsimsel sıcaklık farklılıklarına, özellikle donma çözülme sonucu meydana gelen ilave gerilmelere dayanması gerektiğini söylemişlerdir. Zaimoğlu (2010) polipropilen fiber ile güçlendirilmiş ince daneli zeminin donma çözülme davranışını incelemiş ve en iyi fiber etkisinin %0,75 fiber oranında olduğunu, donma çözülme döngüsüne maruz kalmış zeminlerin serbest basma dayanımının genellikle fiber oranı arttıkça arttığını, fiber ile güçlendirilmiş zeminlerin güçlendirilmemiş zeminlere göre daha sünek olduğunu gözlemlemiştir.

Zaimoğlu ve ark. (2012)'nin bir diğer çalışmasında killi zemine 3 mm, 6 mm ve 12 mm uzunluğunda polipropilen fiber donatı olarak eklenmiş ve serbest basınç deneyleri ile donma çözülme davranışı gözlemlenmiştir. Çalışmalar neticesinde araştırmacılar, farklı uzunluktaki fiber ile rastgele donatılandırılmış zeminin donatısız zemine göre daha sünek davranış sergilediği fakat donma çözülme çevrim sayısı arttıkça serbest basınç dayanımında azalma meydana geldiği sonucuna ulaşmışlardır.

2.4.2.2. Polyester (PET) fiber katkısı

Petrokimya ve tekstil sektörlerinde yapılan araştırma ve gelişmeler neticesinde sentetik polimer fiberler üretilmiştir. Polyester fiberler de bunlardan biridir ve yüksek çekme dayanımına sahiptir (Ndepete, 2017).

Kumar ve ark. (2006) yüksek plastisiteli maksimum birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevasında sıkıştırılmış kil zemine polyester fiberler ekleyerek dayanım karakterlerini araştırmışlardır. Killi zemine kuru ağırlığının %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranlarında polyester fiber katkısında bulunup numuneyi serbest basma deneyine tabi tutmuşlardır. Numunelere ayrı ayrı 3 mm, 6 mm ve 12 mm boyunda düz fiber ve 6 mm boyunda kıvrımlı fiber ilavesi yapılmıştır. Killi numuneye kum katkısı ile serbest basma değerinde %10'a kadar artış meydana geldiği görülmüştür. Kil numunesine katılan %2 oranında 6 mm'lik düz fiber, %1 oranında 12 mm'lik düz fiber ve %1,5 oranında 6 mm'lik kıvrımlı fiber kilin dayanım değerini neredeyse %100 artırmıştır. %10 oranında kum ilaveli killi numuneye %2 oranında 3 mm düz fiber ve %0,5 oranında 12 mm düz fiber eklenmesiyle dayanımda %150 artış meydana gelmiştir. Son olarak %10 oranında kum ilaveli killi zemine %2 oranında 6 mm'lik düz fiber, %1,5 oranında 6 mm'lik kıvrımlı fiber ve %1 oranında 12 mm'lik düz fiber eklenmesiyle temiz kilin dayanımında ilk dayanım değerine göre %180 artış olduğu gözlemlenmiştir.

2.4.2.3. Naylon fiber katkısı

Kumar ve Tabor (2003) siltli kil numunesine rastgele şekilde yerleştirilmiş naylon fiber katkısı ile zeminin dayanım özelliklerini araştırmışlardır. Siltli kil numunesine naylon fiber %0, %0.05, %0,15 ve 0,3 oranlarında katılmıştır. Numuneler standart Proktor enerjisi kullanılarak maksimum kuru birim hacim ağırlığın %93, %96 ve %99 'u elde edilecek şekilde sıkıştırılmış ve numuneler üzerinde serbest basma deneyleri yürütülmüştür. Sonuçların doğruluğu için aynı şekilde tekrar testleri de yapılmış ve bunların sonuçları sıkıştırma derecesinin söz konusu zeminin iyileşme özelliklerini etkileyebildiğini göstermiştir. %93'lük sıkıştırma derecesi daha yüksek yoğunluktaki sıkıştırma derecelerine göre daha fazla doruk ve kalıntı değer göstermiştir. Ayrıca naylon fiber katkısı kalıntı değerler üzerinde doruk değerlere göre çok daha yüksek sonuçlar vermiştir. %0,3 naylon fiber katkısı maksimum kuru yoğunlukta standart Proktor enerjisi ile %93 sıkıştırma derecesine sahip numunenin kalıntı değeri temiz numunenin kalıntı değerine göre yaklaşık olarak 20 kat artmış, doruk değeri ise yaklaşık olarak 4 kat artma göstermiştir. Sonuç olarak naylon fiber katkısı ile numunelerin pik ve kalıntı değerleri üzerinde iyileştirmeler meydana gelmiştir.

BÖLÜM 3. BAZALT VE BAZALT FİBERLER

Bazalt, gabro taş familyasından gelip en önemli özelliği volkanik bir kayaç olmasıdır. Yanardağların püskürmesi sonucu oluşmuş olup diğer taşlardan ayıran en dikkat çekici özelliği çok sert bir yapıya sahip olmasıdır. Aynı zamanda hava ve su ile zehirli kimyasal reaksiyona girmez ve yanmazlar. Diğer kimyasallar ile birlikte tepkimeye girdiklerinde sağlığa ya da çevreye zararlı sonuçlar üretmez. Bazaltın bol bulunan ve kolay ulaşılan bir kayaç olması sebebiyle kullanım alanı da geniştir. Bazaltlar inşaat sektöründe yapı malzemesi olarak, demiryolu, asfalt, köprü ve kaldırım yapımlarında kullanılmaktadır (Parmar ve Mankodi, 2016; URL-2). Şekil 3.1.'de bazalt taşına ait görseller sunulmuştur.

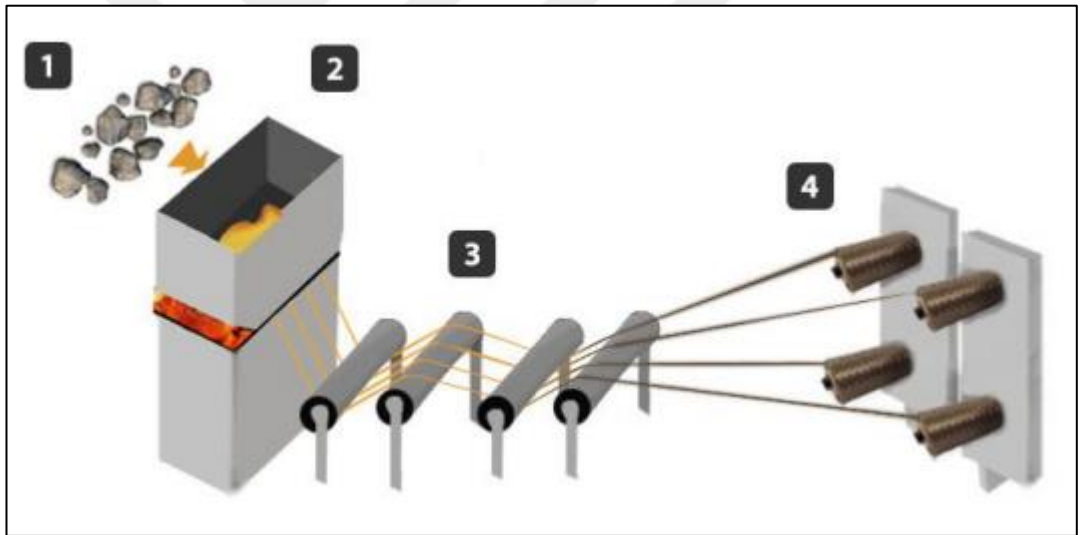


Şekil 3.1. Bazalt taşı örnekleri (URL-3, URL-4).

Bazalt fiber, Amerika'da yaşayan Fransız bir bilim insanı tarafından üretim tekniğinin keşfedilerek 1923 yılında patentinin alınması sonucu ortaya çıkmış ve bu konuda araştırmalar başlamıştır. Amerika ve Sovyet Rusya özellikle askeri alanda bazalt fiber uygulamalarını araştırmışlardır. Bazalt fiberin çeşitli metallerle ve karbon ya da seramik fiberlerle birlikte kullanımı yeni hibrit kompozit materyallerin gelişmesini sağladığı için en gelişmiş ve heyecan verici uygulamalardan biridir (King ve ark., 2014; Parmar ve Mankodi, 2016).

3.1. Bazalt Fiber Üretimi ve Özellikleri

Bazalt fiber üretim metodu cam fiber üretim metoduna birçok yönden benzerlikler gösterir fakat üretim aşamasında daha az enerji gerektirmesi yönüyle cam fiberden ayrılır. Bu yönü ve dünyanın birçok yerinde hammaddesine kolay ulaşılması açısından cam fibere göre oldukça ekonomiktir. Bazalt fiber katkı maddesi, bazalt kayalardan eritme prosesi sonucu çekilerek elde edilir (King ve ark., 2014). Bazalt taşlarının 1300-1700 °C’de eritilmesi ile başlayan süreçte kimyasal bileşimlerine bağlı olarak da mekanik niteliklerinde bir miktar değişkenlikler olabilir. Bazalt fiber üretiminde liflerin çekilmesi prosesinde ortam sıcaklığının da etkisi vardır. Örneğin 1200-1400 °C aralığında sıcaklıklarda elyafın çekme mukavemeti 1,5 GPa’dan 2,9 GPa’a artış göstermektedir. Şekil 3.2.’de bazalt fiber üretim prosesine ait görsel verilmiştir.



Şekil 3.2. Bazalt fiber üretim prosesi (Ocakbaşı, 2019).

Bazalt fiberler üstün derecede sıcaklığa karşı direnç gösterirler. 1200-1300°C aralığındaki sıcaklıklara saatlerce dayanım gösterebilmesi yönüyle cam fiberlerden ayrılırlar. Gerilmeye uğramamış bazalt lifleri ve kumaşları 1250°C’ye kadar bütünlüklerini koruyabilirler ve bu da onları cam ve karbon liflerden üstün kılar. Bazalt fiberlerin gerilme dayanımları 3000-4840 MPa olup E tipi cam fiberlere göre daha sıkı bir yapıya sahiptirler. Aynı zamanda alkali çevreye karşı oldukça kimyasal dirence sahip olup pH 13-14 seviyelerine kadar dayanabilirler.

Asit ve tuza karşı kimyasal direnç gösterirler. Yapılarında %1'den az nem bulundurup hava, su, gazlar, mikroorganizmalar ve mantarlar ile zararlı reaksiyona girmedikleri için korozyon ve mantar direnci gösterirler. Aynı zamanda çevre dostudurlar. Bunlara ek olarak dayanımı oldukça yüksek bir materyal oldukları için de aşınmaya karşı dirençlidirler (Parmar ve Mankodi, 2016).

3.2. Betonda Bazalt Fiber Katkısı

Oltulu ve Oktan (2019) yaptıkları çalışmalarında lifsiz kontrol betonlarına göre farklı görünüm oranlarında bazalt fiber ilavesi ile betonların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Araştırmacılar fiber boyunu 3 mm, 12 mm ve 24 mm olarak tutmuş üç farklı 1/d narinlik oranında (160, 630, 1263) bazalt fiberi %0,025, %0,05, %0,1, %0,15 ve %0,2 olmak üzere beş farklı hacimsel oranlarda rastgele betona eklemişlerdir. Beton içerisine rastgele karıştırılan fiberler kırılmaya sebep olan çatlaklarda köprü görevi görerek betonun çatlamasının önüne geçer ve böylece betonun mekanik davranışını iyileştirir. Yapılan deneyler neticesinde bazalt lif takviyeli betonların basınç dayanımı 1/d oranından bağımsız olarak genellikle hacimce %0,05 oranından yüksek olduğu ilavelerde olumsuz sonuçlar vermiş ise de eğilmede çekme dayanımı için neredeyse tüm grupların dayanımları artmıştır. %0,05 hacim oranından fazla olan numunelerde olumsuz sonuçların fiberlerin rastgele dağılması sonucu bir noktada topaklaşması ve aderans açısından sıkıntı oluşturmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Eğilmede çekme dayanımındaki en iyi artış literatürde pek çalışılmamış olan 3 mm fiber boyunda hacimce %0,15 oranında karıştırılması ile olmuştur.

Günaydın ve Güçlüer (2018) betona bazalt lif takviyesi yaparak mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında çimento hacminin %1 oranında bazalt fiberi beton numunelere ilave etmiş daha sonra numuneleri 7 ve 28 günlük bekleme süresine bırakmıştır. Numuneler üzerinde ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Ultrases geçiş hızına bağlı basınç dayanımı bulgularında 28 günlük numuneler arasındaki korelasyon 0,8 iken 7 günlük numuneler arasındaki korelasyon 0,5 olarak bulunmuştur.

7 günlük korelasyon değerlerinin düşük çıkmasının nedeni hidrasyon ürünlerinin istenilen seviyede tamamlanmamış olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yarmada çekme dayanımı sonuçlarına göre 7 günlük kür süresi sonunda bazalt lif katkısı ile basınç dayanım değerinde %4,45 oranında artış meydana gelirken, yarmada çekme dayanım sonucuna göre de %5,03 oranında artış meydana gelmiştir. 28 günlük kür süresi sonunda bazalt lif katkısı ile basınç dayanım değerinde %2,16 oranında artış meydana gelirken, yarmada çekme dayanım sonucuna göre de %16,46 oranında artış meydana gelmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yarmada çekme veya eğilme dayanımının önemli olduğu durumlarda betona bazalt lif katkısı araştırmacılar tarafından önerilmiştir.

Beycioğlu ve Aruntaş (2014) yaptıkları çalışmada bazalt fiber donatının yüksek dayanımlı betonla olan aderans ilişkisi ile çelik donatının yüksek dayanımlı betonla olan aderans ilişkisini mukayese etmişlerdir. Bazalt lifli yapay donatı ve çelik donatı içeren beton üretilmiş ve beton dayanımı 28 günlük kür süresinin sonunda 75,06 MPa, 90 günlük kür süresinin sonunda ise 79,84 MPa değerine ulaşmıştır. Ayrıca $\phi 20$ kenetlenme boyu kullanıldığında, bazalt lifli donatının referans alındığı çelik donatı gibi 28 ve 90 günlük kür süreleri sonunda betondan sıyrılmadığı gözlemlenmiştir. Bazalt lifli donatı, çelik donatı için verilen çekme gerilmeleri sınır değerlerinin bile üzerindeki değerler de yüksek dayanımlı beton ile olan aderansını yitirmemiştir.

3.3. Zemin İyileştirmesinde Bazalt Fiber Katkısı

George ve Ramya (2017) organik zemine bazalt fiber katkısı üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada 10 mm, 20 mm ve 30 mm uzunluğundaki bazalt fiberleri organik zemine ağırlıkça %0,05, %0,1 ve %0,15 oranlarında ilave etmiş hazırlanan numuneler üzerinde serbest basma ve kompaksiyon deneyleri yapmışlardır. Serbest basma dayanım testi için hazırlanan numuneler kompaksiyon deneyi sonucu elde edilen optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığa göre hazırlanmıştır.

Fiber yoğunluğunun artışı ile maksimum kuru birim hacim ağırlıkta artış meydana gelmiş, bu artışın da fiberin yoğunluğunun artmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Yine aynı şekilde fiber oranının artışı ile optimum su muhtevasında azalma meydana gelmiş, bu azalmanın da fiberin düşük su absorbe etme özelliğinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Serbest basma deneylerinden elde edilen sonuçlara göre anında, 7 gün, 14 gün ve 28 gün kür süresi sonunda ve fiber oranının artması ile katkılı numunelerde dayanım artışı olduğu görülmüştür. Bazalt fiber ile güçlendirilmiş kilin çalışma mekanizmasında, zeminin dayanımı zemin fiber arasındaki ara yüz kuvvetinden etkilenir. Fiber oranı arttığında, fiber filamentleri arasındaki elektriksel etkileşim göz ardı edilemez. Aynı zamanda fiber uzunluğu toplam gerilmeyi ve zemin fiber dağılım modelini etkiler ve zemin numunelerinin tümünün gerilmesi de etkilenmiş olur. Zemin numuneleri içerisinde maksimum dayanım artış oranı 28 günlük kür süresi sonunda zemine %0,05 oranında katılmış 10 mm uzunluğundaki fiber numunelerde gerçekleşmiştir. Dayanım temiz organik kil numunesine göre %650 oranında artış göstermiştir.

Gao ve ark. (2015) bazalt fiber ile güçlendirilmiş killi zeminin serbest basma dayanımı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Araştırmacılar çalışmalarında bazalt fiberin oranı ve uzunluğunu dikkate almışlardır. Fiber oranının dikkate alındığı çalışmada 12 mm uzunluğundaki fiberler killi zemin numunesine %0,05, %0,1, %0,15, %0,2, %0,25, %0,30 ve %0,35 oranlarında katılmıştır. Fiber uzunluğunun dikkate alındığı çalışmada ise 4 mm, 8 mm, 12 mm ve 15 mm uzunluğundaki fiberler killi zemin numunesine %0,05 oranında katılmıştır. Serbest basma deneyi sonucuna göre fiber boyu sabit tutulduğunda gerilme önce artmış, sonra azalma göstermiş olup, en iyi artış %0,25 fiber oranında meydana gelmiştir. Fiber oranı sabit kaldığında ise gerilme önce artma, daha sonra hafif şekilde azalma göstermiş olup maksimum gerilme değerine ise 12 mm fiber uzunluğunda erişilmiştir. Çalışmalar neticesinde bazalt fiber ile iyileştirilmiş killi zeminin “poststrong” özelliği olduğu kanısına da varılmıştır. Araştırmacılar poststrong özelliği şu şekilde tanımlamıştır; fiber takviyeli numunelerin daha yüksek kırılma gerilmelerine ve daha yüksek rezidüel (kalıntı) değerlere sahip olması ve aynı zamanda ilerleyen deformasyon süresinde daha sabit performans göstermesidir.

Ek olarak fiber takviyeli killi zeminin dayanımının fiber-zemin kolon ve ağına dayanarak ara yüz kuvvetinden etkilendiği görülmüştür.

Ndepete ve Sert (2017) bazalt fiber takviyeli doymuş siltli zeminlerin mekanik davranışı üzerine deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada 6 mm, 12 mm ve 24 mm uzunluğundaki bazalt fiberleri siltli zemine ağırlıkça %1, %1,5 ve %2 oranlarında olacak şekilde ilave etmişlerdir. 100 kPa düşey gerilme altında konsolide olmuş doymuş haldeki silt zeminden 40 adet numune üç eksenli hücre kesme deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda bazalt fiber uzunluğunun artması ile dayanımın da arttığı, maksimum dayanım değerini ise 24 mm uzunluğundaki fiberin verdiği görülmüştür. Fiber oranının artmasıyla dayanımda önce bir artış sonra bir azalış meydana geldiği görülmüş ve maksimum değer %1,5 fiber oranında elde edilmiştir. Fiber takviyeli zemin, katkısız zemine göre daha yüksek kırılma dayanımı ve daha stabil performans göstermiştir.

BÖLÜM 4. MALZEMELER VE YÖNTEM

Bu bölümde araştırmada kullanılan malzemelerin özellikleri, karışım oranları ve numunelerin hazırlanışı ile ilgili bilgiler verilmiştir. Çalışmada kullanılan deney düzeneği ve hazırlanış şekilleri anlatılmış, deney sonucu elde edilen veriler tablo ve grafikler eşliğinde açıklanmıştır. Fiber boyu ve oranının, bazalt fiber katkılı kil zemin üzerindeki etkisi bu çalışma kapsamında araştırılmıştır. Fiber boyu 6 mm, 12 mm ve 24 mm olan bazalt fiber, kil zemin numunesine %1, %1,5, %2 ve %2,5 oranlarında ilave edilmiş olup hazırlanan numuneler kesme kutusu deneyine tabi tutulmuştur.

4.1. Malzemeler

4.1.1. Kil zemin

Araştırmada kullanılan kil zemin numunesi Düzce ilinden temin edilmiş olup, çalışmalarda kullanılacak kil miktarı kadar malzeme 40 no'lu (0.425 mm) elekten elenerek yabancı maddelerden ayrıştırılmıştır (Şekil 4.1.). Araştırmada kullanılan kil zeminin fiziksel özelliklerine ait veriler Tablo 4.1.'de, dane dağılım eğrisi ise Şekil 4.2.'de sunulmuştur.

Elenerek elde edilen malzeme üzerinde yapılan fiziksel deneylerin sonuçlarına göre bu çalışma kapsamında kullanılacak zeminin Türk Standardı (TS1500, 2000) ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre zemin sınıfı yüksek plastisiteli kil (CH) çıkmıştır.

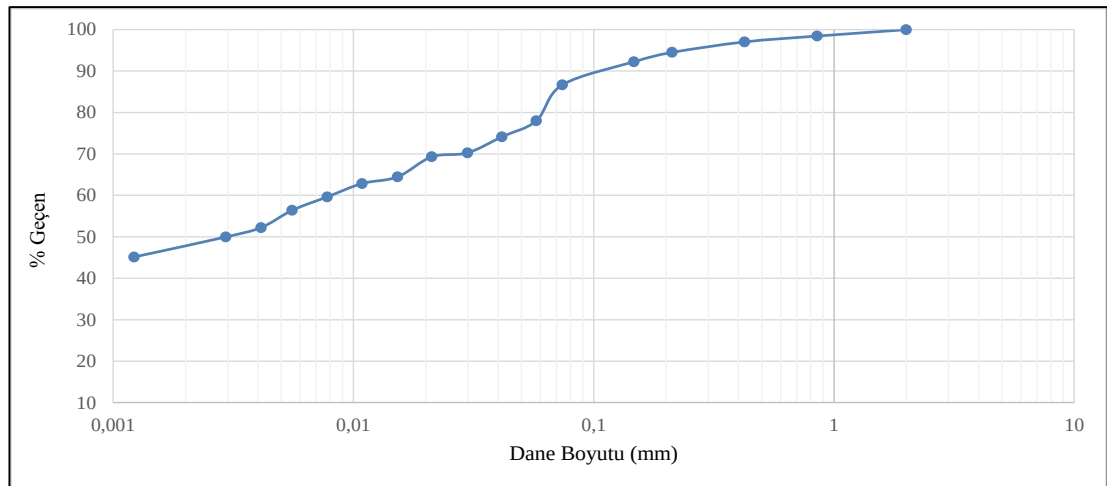


Şekil 4.1. Kil zemin numunesinin ayrıştırılıp elenmesi.

Tablo 4.1. Kil numunesinin fiziksel özellikleri.

Özellik	Değer	Simge ve Birim
Likit Limit	54	LL (%)
Plastik Limit	15	PL (%)
Plastisite İndisi	39	IP (%)
Özgül Ağırlık	2,64	G_s
Silt Oranı	39	M (%)
Kil Oranı	47	C (%)
İnce Oranı	86	FC (%)

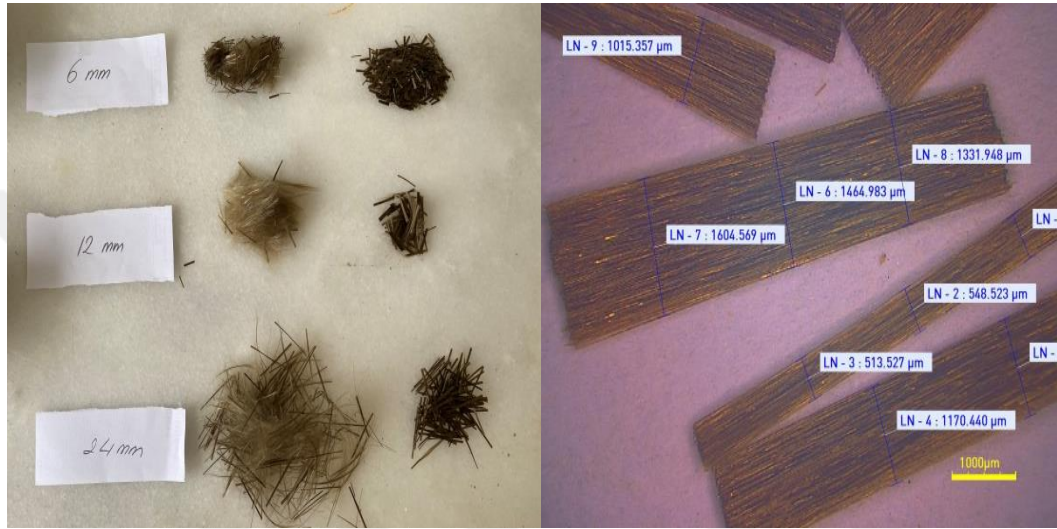
USCS ve TS sınıflamasına göre zemin sınıfı CH



Şekil 4.2. Kil zemin numunesine ait dane dağılım eğrisi.

4.1.2. Bazalt fiber

Araştırma kapsamında kullanılan bazalt fiber Spinteks Tekstil İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş (Türkiye) tarafından temin edilmiştir. 6 mm, 12 mm ve 24 mm bazalt fiber boyuna ait görüntüler Şekil 4.3.'te gösterilmiş olup, fiberlere ait fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 4.2.'de verilmiştir.



Şekil 4.3. Bazalt fiberin makro ve mikroskopik görünümü (Ocakbaşı, 2019).

Tablo 4.2. Bazalt fibere ait fiziksel ve mekanik özellikler (Ocakbaşı, 2019).

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	mm
Uygulamanın Sıcaklığı	450 - 550	°C
Erime Noktası	1350	°C

4.2. Yöntem

Bu deneysel çalışmada öncelikle zemin sınıfının belirlenmesi için TS 1900-1 uyarınca likit limit (Casagrande ve koni düşürme yöntemleri ile), plastik limit ve elek analizi deneyleri yapılmış olup, zemin numunesi içerisindeki silt ve kil oranını belirlemek için hidrometre, özgül ağırlığı belirlemek için ise piknometre deneyleri yapılmıştır.

Deney numuneleri kil zeminin suya doyurulması ile elde edileceği için likit limit değerinin 1,5 katı kadar su ilavesi ile zemin suya doymuş hale getirilmiştir. Kil zemin numunesine 6 mm, 12 mm ve 24 mm uzunluğundaki fiberler, toplam karışımın kütlesi sabit tutularak doğal zemine ağırlıkça %1, %1,5, %2 ve %2,5 oranlarında olacak şekilde ilave edilerek bulamaç haline getirilmiştir. Bulamaç haline getirilen numuneler genişliği 6 cm x 6 cm, boyu 12 cm olan dikdörtgen şekilli deney kabı içerisine alınıp 17 kg yük altında 1 hafta boyunca ön konsolidasyona tabi tutulmuştur. 45 kPa ön konsolidasyona tabi tutulan zemin numuneleri 50, 100 ve 150 kPa'lık normal gerilme altında kesme kutusu deneyine tabi tutulmuşlardır. Bu çalışma kapsamında hazırlanmış numunelere ait kil ağırlığı, bazalt fiber boyu, oranı ve ağırlıkları Tablo 4.3.'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Karışımlardaki kil ve fiber ağırlığı, fiber boyu ve oranları.

Karışım No	Numune Tanımı	Kil Ağırlığı (gr)	Fiber Ağırlığı (gr)	Fiber Uzunluğu (mm)	Fiber Oranı (%)
1	Doğal Zemin (kil)	400	0	0	0
2	%1 fiber katkılı kil	400	4	6	1
3	%1,5 fiber katkılı kil	400	6	6	1,5
4	%2 fiber katkılı kil	400	8	6	2
5	%2,5 fiber katkılı kil	400	10	6	2,5
6	%1 fiber katkılı kil	400	4	12	1
7	%1,5 fiber katkılı kil	400	6	12	1,5
8	%2 fiber katkılı kil	400	8	12	2
9	%2,5 fiber katkılı kil	400	10	12	2,5
10	%1 fiber katkılı kil	400	4	24	1
11	%1,5 fiber katkılı kil	400	6	24	1,5
12	%2 fiber katkılı kil	400	8	24	2
13	%2,5 fiber katkılı kil	400	10	24	2,5

4.2.1. Fiziksel deneyler

Sınıflama deneyleri doğal zemin numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Casagrande ve Koni Düşürme deneyi ile likit limit, plastik limit değerleri bulunmuş, kil zemin numunesi içerisindeki silt ve kil oranlarını bulmak için hidrometre deneyi yapılmıştır. Son olarak özgül ağırlığını bulmak için piknometre deneyi yapılmıştır.

4.2.1.1. Atterberg limitleri

Kıvam limitleri olarak bilinen Atterberg Limitlerine yönelik deneyleri zemin danecikleri ve su arasındaki ilişkiyi ve değişen su içeriğine göre zeminin kıvam durumunu tanımlamak için yapılır. Kil zemin numunesinin kıvam tanımlamasının yapılabilmesi için bu çalışmada TS 1900-1 uyarında Atterberg Limiti deneyleri yapılmış olup deney sonrası elde edilen veriler ile zeminler TS 1500/2000 standardı uyarınca sınıflandırılmışlardır. Şekil 4.4.'te kil numunesinin likit limit değerinin tayini için yapılan Casagrande ve Koni Düşürme deneylerine ait fotoğraflar sunulmuştur. Likit limit zeminin kendi ağırlığı altında akabileceği en düşük su içeriğidir. Casagrande yönteminde yaklaşık olarak 200-300 gram kil zemin numunesi damıtılmış su ile yoğurulur ve bir miktar numune alınarak Casagrande alet kabına 1 cm kalınlığında olacak şekilde sürülüp, yatay şekilde yüzeyi düzlenir. Sonrasında oluk açma bıçağı ile yukarıdan aşağı doğru tabanı 2 mm olan iki yarım daire görünümü olacak şekilde yarık açılır. Cihaz kolu 2 tur/sn hızla 1 cm yukarıdan düşürülür ve açılan yarık 13 mm civarı bir uzunluk ile kapandığı anda deney sonlandırılır ve su muhtevası ölçümü için numune alınıp etüve koyulur. Numunenin su içeriğinin arttırılması ile yürütülen deney toplamda en az 4 kez tekrarlanır ve 25 vuruşa karşılık gelen su muhtevası değeri likit limit (w_L) olarak alınır.

Konik penetrometrenin çalışma prensibi homojen şekilde hazırlanmış zemin numunesi içerisine konik şekilli metalin kendi ağırlığınca batırılması yöntemine dayanır. 200-300 gram kadar alınmış zemin numunesi içerisine damıtılmış su eklenerek zemin homojen hale getirilir.

Penetrometre deneyi için uygun kaba alınan numunenin kabın şeklini almasına ve boşluk kalmamasına dikkat edilerek zemin yüzeyi spatula yardımı ile düzlenir. Konik penetrometre deney makinesine konulan zemin numunesine konik metalin batması sağlanır ve 5 saniye süre ile beklenir. Sürenin tamamlanması akabinde batma miktarı makineden okunur. Numune üzerine farklı üç noktaya koni batırma işlemi 3 kez tekrarlanır ve bu tekrarların ortalaması alınır. Bu işlem artan su miktarı ile 3 defa daha tekrarlanır ve alınan numuneler su muhtevası ölçümü için etüve konulur.

Bu işlemler sırasında koninin batma miktarının 15 mm - 25 mm arasında ölçülecek şekilde numuneye su ilavesi yapılır, aksi takdirde deney iptal edilir. Sonuç olarak ortalama 20 mm batma miktarına gelen su muhtevası likit limit (w_L) değeri olarak alınır.



Şekil 4.4. Casagrande ve Konik Penetrometre deneyi yapılışı.

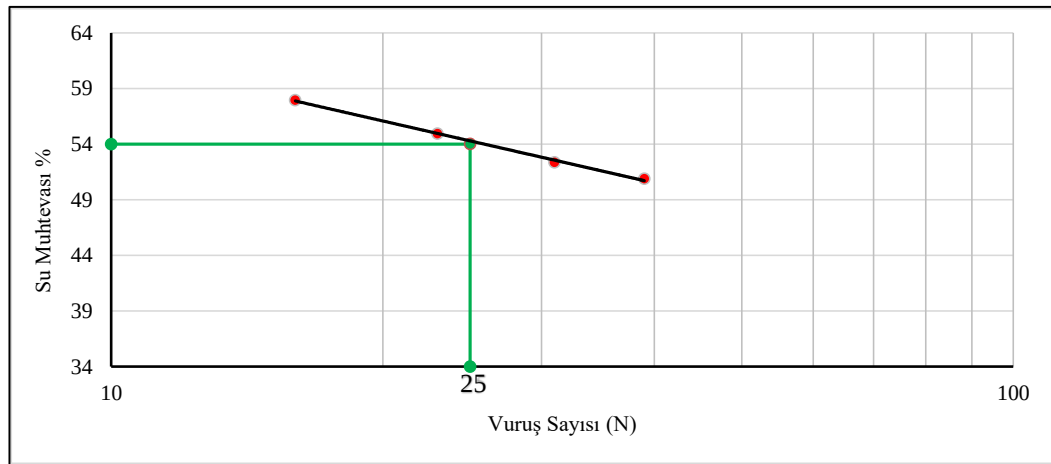
Plastik limit (w_p) zeminin plastik halden yarı katı hale geçtiği sınır değeridir. Plastik limit değeri tayini için bir miktar numune damıtılmış su ile homojen hale getirildikten sonra buzlu bir cam levha üzerine serilip el ile yuvarlama suretiyle 3 mm kalınlığında çubuklar haline getirilir.

Silindirlerin tam olarak 3 mm çapa ulaştığı anda üzerlerinde çatlamalar başlıyorsa söz konusu numunelerin yaş ağırlığı tartılarak etüve konulur ve 105°C'de 24 saat kurutularak dane ağırlığı ölçülür. Bu suretle elde edilen su muhtevası numunenin plastik limit değeri olarak alınır. Şekil 4.5.'te plastik limit değeri tayini için yapılan işlemler gösterilmiştir.

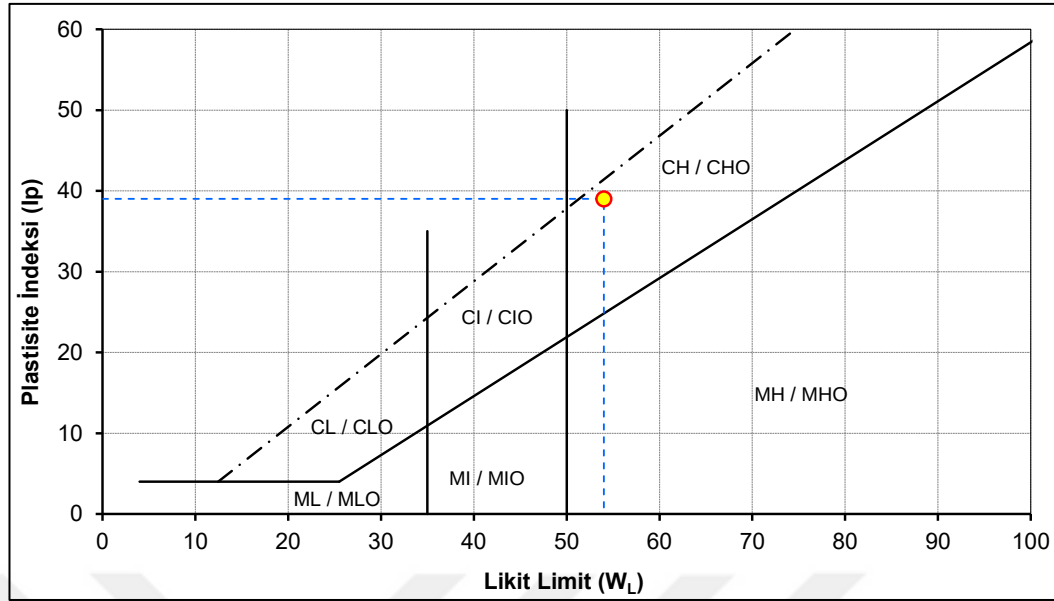


Şekil 4.5. Plastik limit deneyi yapılışı.

İnce daneli zeminleri sınıflandırmak için Plastisite kartı kullanılmaktadır. Plastisite kartında düşeyde plastisite indisi, yatayda ise likit limit değeri bulunur. Likit limit ve plastik limit arasındaki fark plastisite indisini verir. Plastisite indisi ve likit limit değerlerinin plastisite kartında kesiştirilmesi ile zeminin sınıfının belirlenmesi sağlanır. TS 1500/2000 uyarında ince daneli zemin numunesi A doğrusu üzerinde kalıyorsa killi zemin olarak sınıflandırılmaktadır. Likit limit değeri 50'nin üzerinde olan killi zemin yüksek plastisiteli olarak isimlendirilir ve H simgesini alır. Şekil 4.6. ve Şekil 4.7.'de görüleceği üzere yapılan deneyler neticesinde kullanılan bu zemin numunesinin likit limit değeri 54, plastik limit değeri 15 ve plastisite indisi değeri 39 olarak elde edilmiş ve TS 1500/2000'e göre zemin sınıfının yüksek plastisiteli kil (CH) olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4.6. Likit limit akma doğrusu.

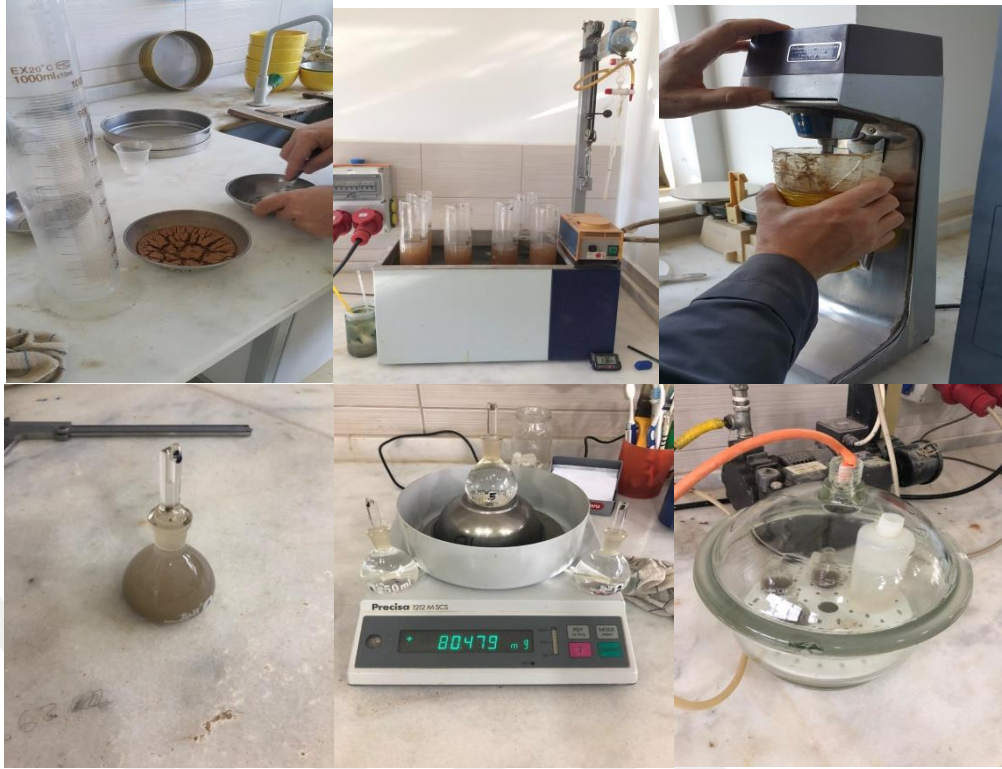


Şekil 4.7. Kilin TS 1500/2000 plastisite kartındaki yeri.

4.2.1.2. Elek analizi, hidrometre ve özgül ağırlık deneyleri

Bu çalışma kapsamında killi zeminin dane çapı dağılımı, TS 1900-1/2006'ya göre yapılan elek analizi ve hidrometre deneyleri ile belirlenmiştir. Yıkamalı elek analizi deneyi 75 μm 'den büyük danelerin dane çapı dağılımını, hidrometre deneyi ise 75 μm 'den daha küçük danelerin dane çapı dağılımını belirlemek için kullanılmaktadır. Şekil 4.2.'den de görüleceği üzere deneyde kullanılan zeminin %86'sı ince daneli olup içerisinde %39 silt, %47 kil boyutu dane bulundurmaktadır.

Özgül ağırlık deneyinde ise numunenin özgül ağırlığını belirlemek için 50 ml hacimli piknometre şişeleri kullanılmıştır. Piknometre şişeleri 105°C etüvde öncelikle kurutulmuş, daha sonra piknometre içerisindeki su ve su + numune durumunda ağırlıkları bulunmuş ve ölçümler sırasında hava kalmamasına dikkat edilmiştir. Bu hususta çok hassas davranılmış ve numuneler desikatöre yerleştirilerek havaları alınmıştır. Yapılan deney neticesinden çalışılan kil için özgül ağırlık değeri 2,64 olarak bulunmuştur. Şekil 4.8.'de hidrometre ve özgül ağırlık deneylerine ait görseller sunulmuştur.



Şekil 4.8. Hidrometre ve özgül ağırlık deneyine ait fotoğraflar.

4.3. Doygun Numunelerin Konsolide Edilerek Hazırlanması

Araştırmanın bu aşamasında doğal kil ve bazalt fiber katkılı kil numuneler 17 kg düşey yük gerilmesine tekabül eden 45 kPa gerilme altında 1 hafta ön konsolidasyona tabi tutulmuştur. Numuneler likit limitin 1,5 katı su muhtevasında bulamaç olarak hazırlandığı için doymuş oldukları kabulü yapılmıştır.

Doğal kil numunesi üzerine katkı malzemesi olarak 6 mm, 12 mm ve 24 mm uzunluğunda olmak üzere bazalt fiberler ağırlıkça %0, %1, %1,5, %2 ve %2,5 oranlarında ilave edilmiştir. Toplamda 13 adet ön konsolidasyon işlemi yürütülmüş ve her bir numuneden üçer adet olmak kaydıyla 39 adet doymuş numune elde edilerek numuneler kesme kutusu deneyine tabi tutulmuştur.

Çalışma sürecinin ilk aşamasında bazalt fiberlerin kendi içinde ayrılma problemi olmasından dolayı basınçlı havalandırma yöntemiyle fiberlerin birbirinden ayrılıp saç teli gibi ince elyaflar haline gelmesi sağlanmıştır (Şekil 4.9.).

Akabinde katkılı ve katkısız tüm kil numuneler için likit limitin 1,5 katı su katılarak numune bulamaç haline getirilmiştir. Numunenin toplam kütlesi sabit tutularak her bir karışım için 400 gram doğal kil numunesine 230 gram su ve bahsedilen oranlarda bazalt fiber katkısı ilave edilmiştir (Şekil 4.10.). Elde edilen karışım spatula yardımı ile karıştırılarak homojen hale getirildikten sonra içerisindeki hava boşluklarından arındırılmak için desikatöre koyulmuştur. Bulamaç haline getirilen numune, 60x60x120 mm boyutundaki dikdörtgen hücreye altına kaymaz tabaka, üzerine 1 cm kalınlığında ince kum ve poroz kağıdı konularak ve boşluklu yapı kalmaması adına belirli aralıklarla şişlenerek ilave edilmiştir. Numunenin üzerinin kurummasının önlenmesi için üzeri su ile doldurulmuştur. Bulamaç numuneler kendi ağırlığı altında bir gün, yavaş yavaş arttırılan düşey kuvvet altında ise 6 gün bekletilerek konsolide edilmiştir. Yeniden hazırlanan her bir killi zemin + bazalt fiber karışımından üçer adet numune alınarak 60x60x25 mm boyutlarındaki kesme kutusu çelik halkası içine koyulup deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.11.).



Şekil 4.9. Farklı uzunluktaki bazalt fiberlerin basınçlı hava ile ayrıştırılmış ve orijinal halleri.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.10. (a) Fiber ve su ilaveli kil zemin, (b) Bazalt fiber ilaveli bulamaç karışım, (c) Karışımın hava kabarcıklarından arındırılması, (d) Karışımın hücreye alınması.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

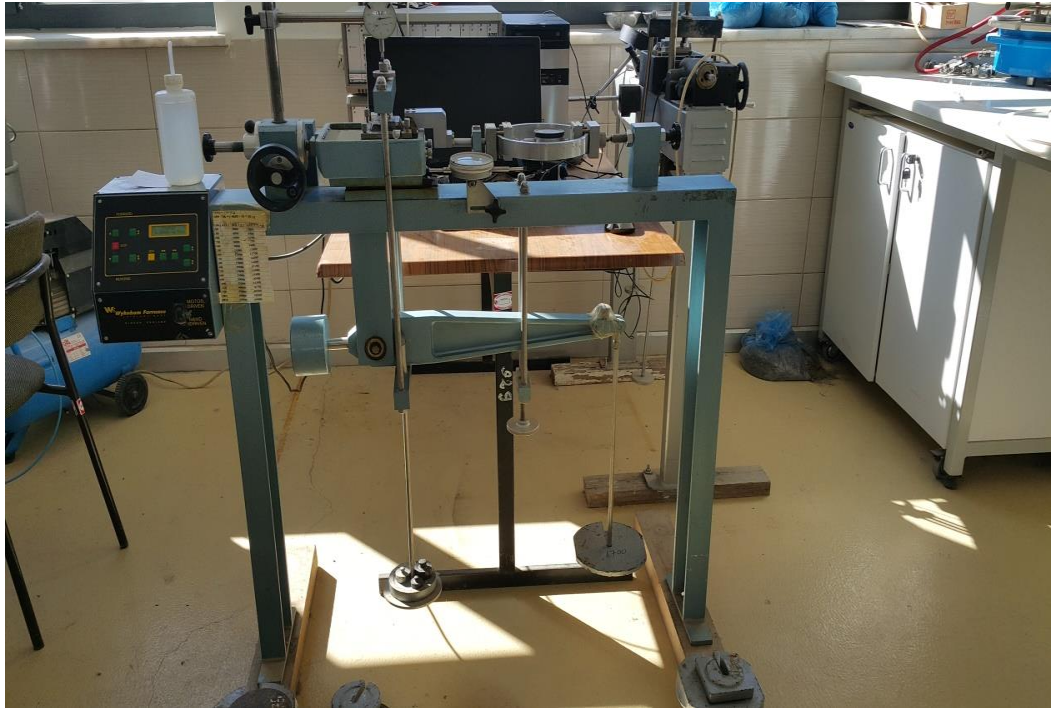


(f)

Şekil 4.11. (a) Hücre içerisindeki numune örneği, (b) Hücrenin tabanında bulunan konsolidasyonu sağlayan ince kum, (c) Hücre içinden numunelerin tedariki, (d) Kesme kutusu çelik halkası içine alınmış numune örneği, (e) Numunenin yüzeyinin spatula ile düzgünleştirilme.

4.4. Kesme Kutusu Deneyleri

Doğal kil ve katkılı kil numunesi üzerinde yürütülen deneylerde katkılı kil numuneleri 6 mm, 12 mm ve 24 mm uzunluğunda bazalt fiber ilavesi ile hazırlanmıştır. Söz konusu bazalt fiber uzunlukları kil numuneye ağırlıkça %0, %1, %1,5, %2 ve %2,5 oranlarında olacak şekilde ilave edilmiştir. Örneğin; 6 mm ve %1 oranında bazalt fiber – kil bulamaç karışımı için 400 gram kuru kil numunesi + 230 gram su ve 6 mm'lik 4 gram bazalt fiber ($400 \times 1/100 = 4$) bulamaç haline getirilmiştir. Bahsi geçen fiber boyu ve oranları için deneyler sırası ile tatbik edilmiştir. Hazırlanan bulamaç halindeki karışım 60x60x120 mm boyutundaki hücrede 7 gün ön konsolidasyona bırakılmıştır. Konsolide edilerek oluşturulan her yeni numune için hücre içerisinden 3 adet örnek alınmıştır. Alınan örnekler sırası ile 50, 100 ve 150 kPa düşey yük altında, haznesi su ile dolu kesme kutusu cihazında 1'er gün konsolidasyona bırakılmış, ardından 0,2 mm/dk hızla kesilmiştir. Şekil 4.12.'de deneye ait kesme kutusu cihazı Şekil 4.13.'te ise deneye tabi tutulup kesilmiş 3x13=39 adet numune örnekleri verilmiştir.



Şekil 4.12. Kesme kutusu cihazı.

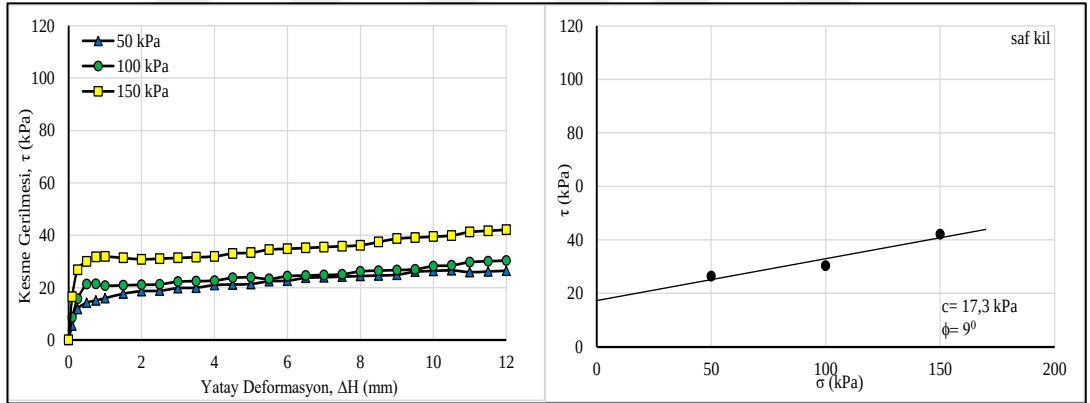


Şekil 4.13. Kesme kutusu deneyi sonrası bütün zemin örnekleri.

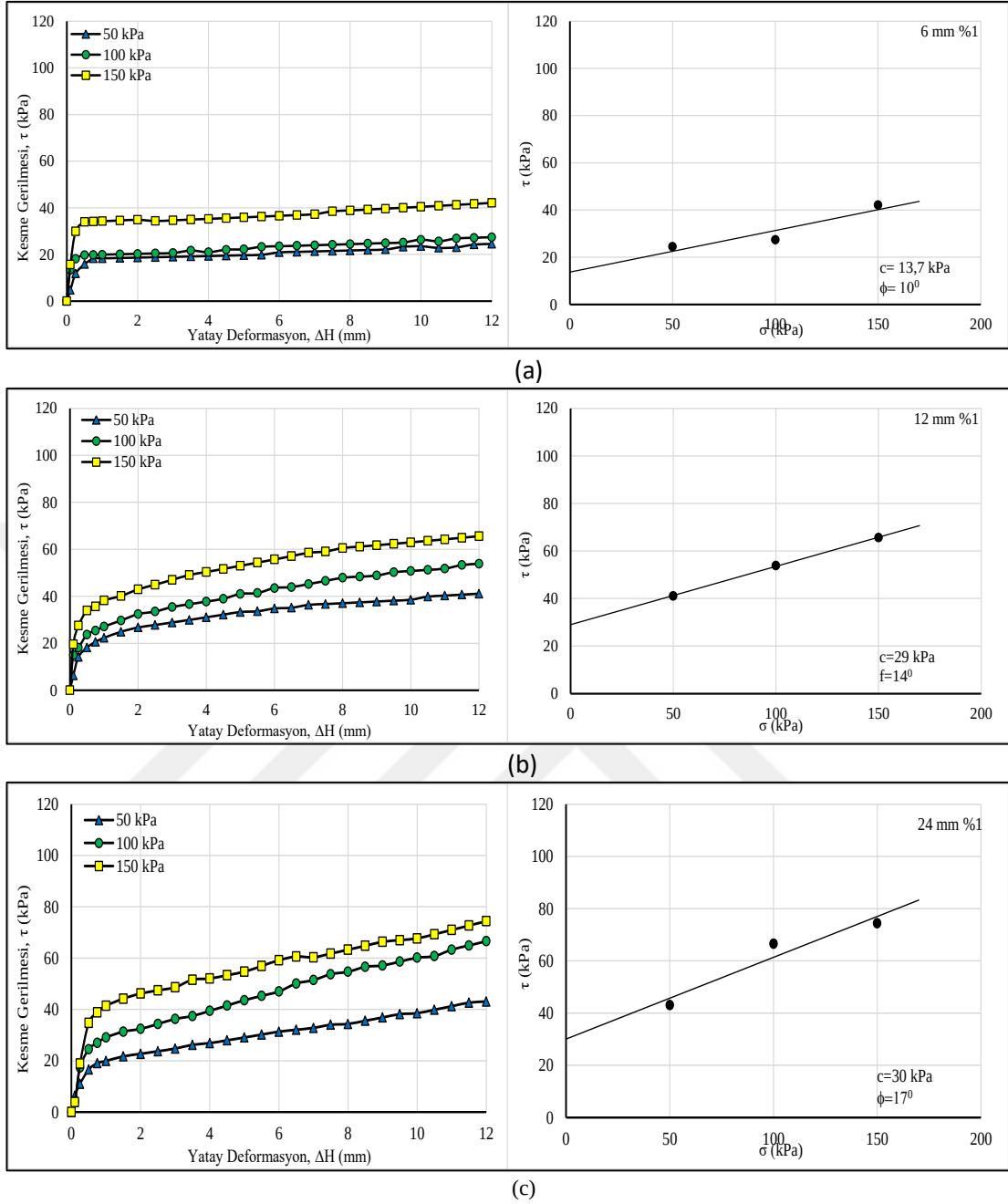
BÖLÜM 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

5.1. Kayma Direnci Parametreleri Deney Sonuçları

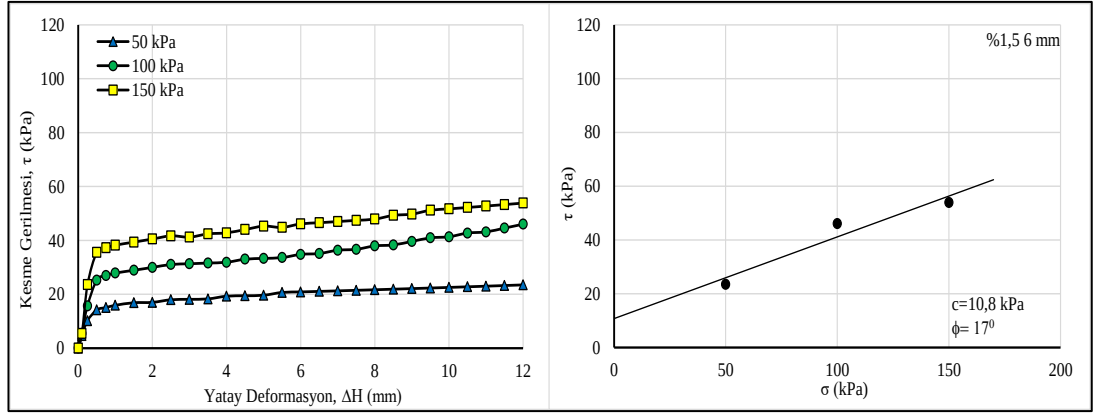
Şekil 5.1.'de fiber katkısız kilin kesme kutusu deney sonuçları verilmiştir. Buna göre saf kilin kayma direnci açısı 9^0 ve kohezyon değeri ise 17.3 kPa olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.2., Şekil 5.3., Şekil 5.4. ve Şekil 5.5.'te ise fiber katkılı tüm numunelerin yatay deformasyon-kayma gerilmesi grafikleri ile, kayma direnci değerlendirmesini gösteren grafikler sunulmuştur. Tablo 5.1.'de ise kayma direnci açısından değerlendirilen tüm numunelerin özet sonuç tablosu verilmektedir.



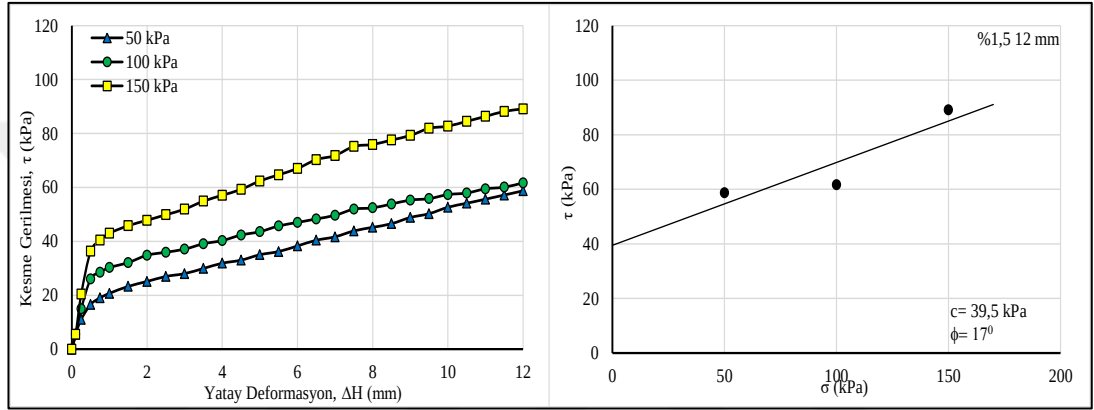
Şekil 5.1. Saf kil numunesi.



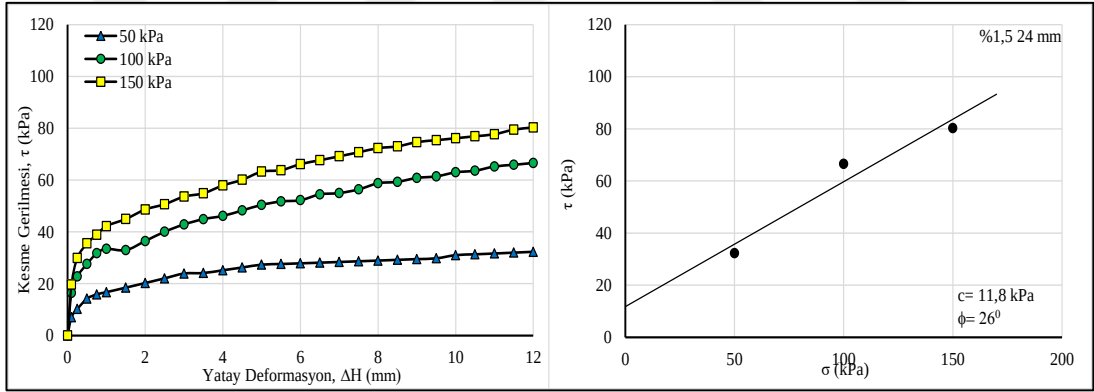
Şekil 5.2. %1 fiber oranı (a) 6 mm, (b) 12 mm, (c) 24 mm.



(a)

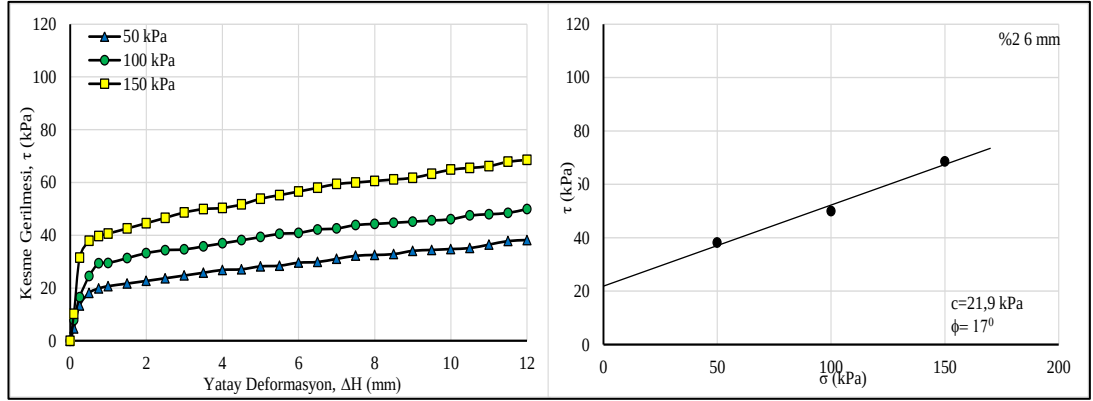


(b)

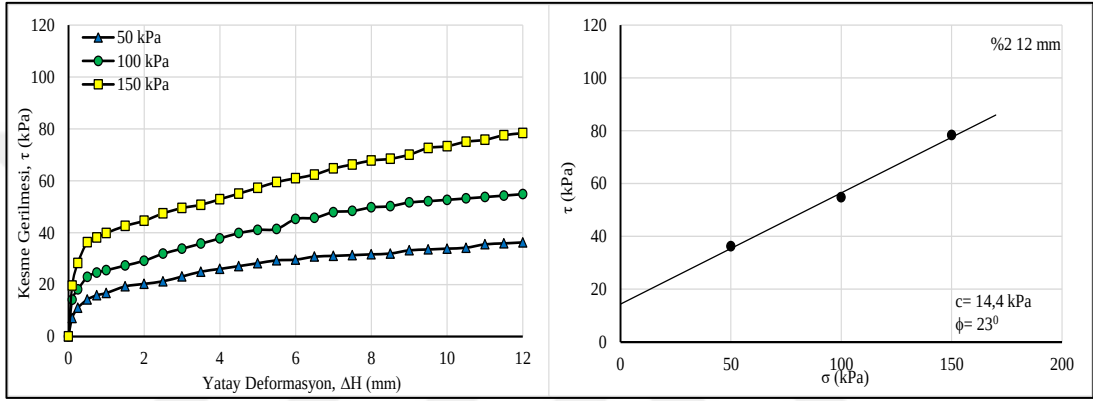


(c)

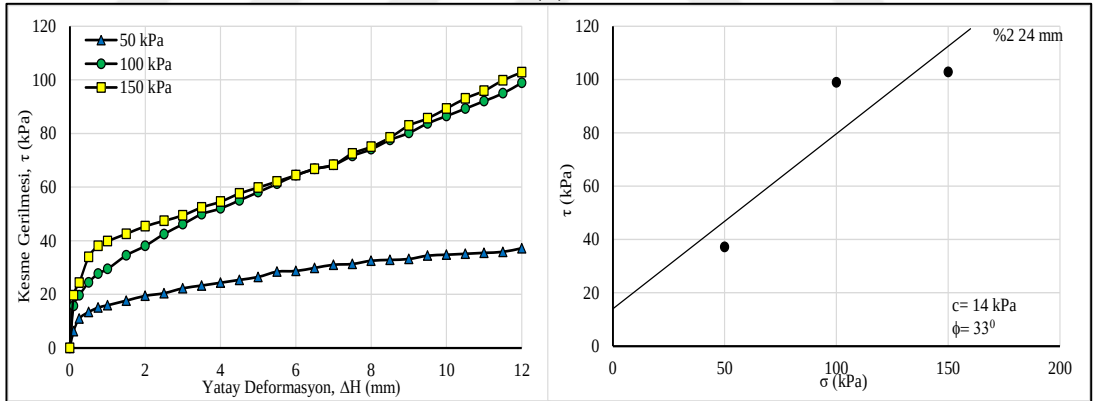
Şekil 5.3. %1,5 fiber oranı (a) 6 mm, (b) 12 mm, (c) 24 mm.



(a)

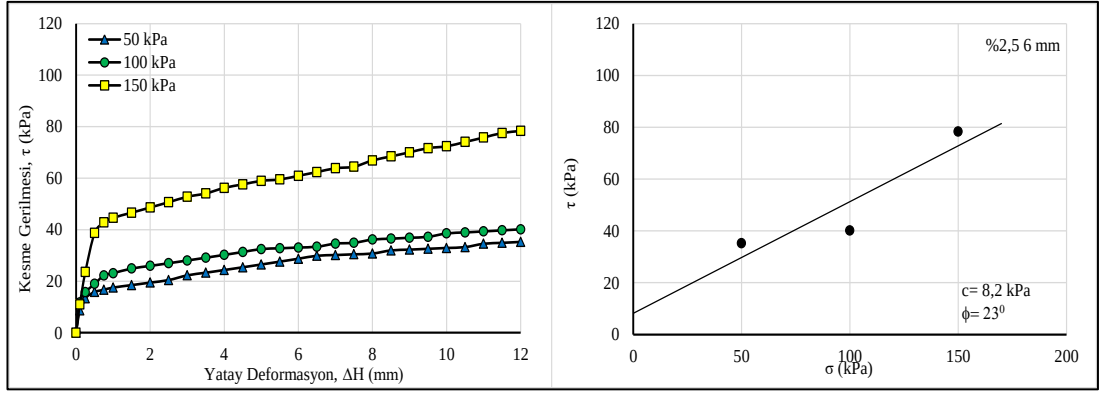


(b)

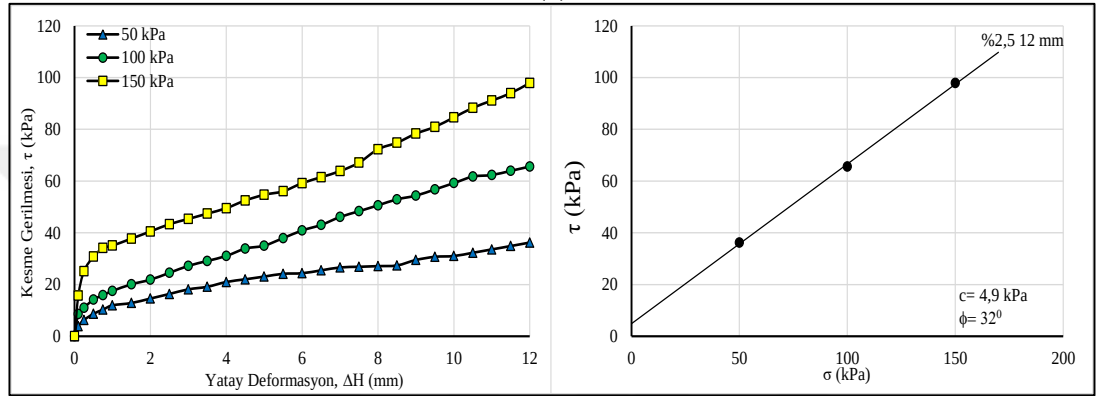


(c)

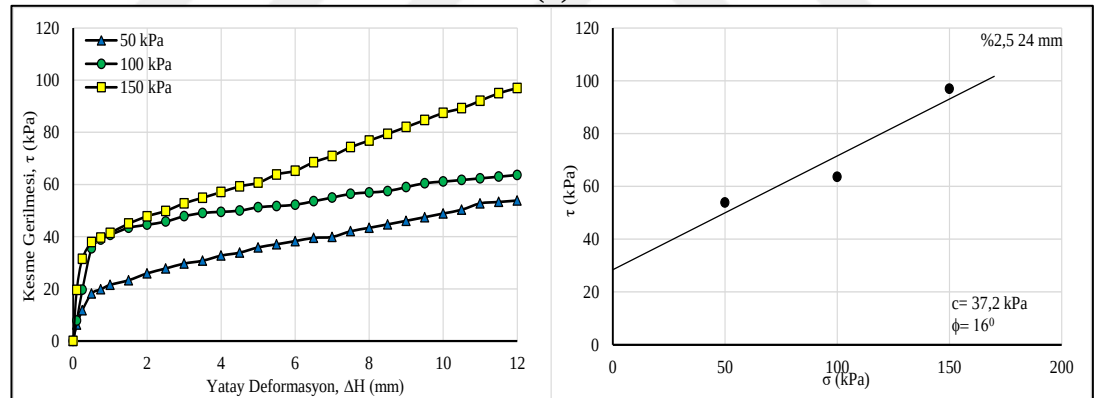
Şekil 5.4. %2 fiber oranı (a) 6 mm, (b) 12 mm, (c) 24 mm.



(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.

Karışım no.	Numune Tanımı	Fiber Uzunluğu (mm)	c	ϕ	ρ_n	r_c	Değişim Oranları	
							r_ϕ	r_{ρ_n}
1	Doğal zemin (kil)	0	17,3	9	15,48	1,000	1,000	1,000
2	%1 fiber katkılı kil	6	13,7	10	15,79	0,792	1,111	1,020
3	%1,5 fiber katkılı kil	6	10,8	17	16,64	0,624	1,889	1,075
4	%2 fiber katkılı kil	6	21,9	17	16,79	1,266	1,889	1,085
5	%2,5 fiber katkılı kil	6	8,2	23	16,32	0,474	2,556	1,054
6	%1 fiber katkılı kil	12	29	14	16,75	1,676	1,556	1,082
7	%1,5 fiber katkılı kil	12	39,5	17	16,33	2,283	1,889	1,055
8	%2 fiber katkılı kil	12	14,4	23	16,85	0,832	2,556	1,089
9	%2,5 fiber katkılı kil	12	4,9	32	16,44	0,283	3,556	1,062
10	%1 fiber katkılı kil	24	30	17	16,05	1,734	1,889	1,037
11	%1,5 fiber katkılı kil	24	11,8	26	16,08	0,682	2,889	1,039
12	%2 fiber katkılı kil	24	14	33	16,80	0,809	3,667	1,085
13	%2,5 fiber katkılı kil	24	37,2	16	17,10	2,150	1,778	1,105

Yürütülen deneysel çalışmada 3 tanesi doğal zemin ve 36 tanesi 6 mm, 12 mm ve 24 mm uzunluğundaki bazalt fiberlerin zemine ağırlıkça %0, %1, %1,5, %2 ve %2,5 oranlarından eklenerek hazırlanan toplamda 39 adet numune üzerinde çalışılmıştır. Numuneler üzerinde yürütülen kesme kutusu deneyi değerlendirmeleri Şekil 5.1., 5.2., 5.3., 5.4., 5.5.'e gösterilmiş ve Tablo 5.1.'de sonuçları özetlenmiştir. Tabloda ayrıca değişik oran ve uzunluklardaki fiber katkısının ilgili parametreler üzerindeki etkisini incelemek üzere değişim oranları da (Denklem 5.1) eklenmiştir. Burada değişim oranı, r;

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

formülü ile hesaplanmıştır. Buna göre bazalt fiber katkısı ile kohezyon değerindeki en büyük artış 12 mm uzunluğunda %1,5 fiber katkılı numunede 2,28 olmuştur. Bununla birlikte tablodan fiber katkısının kohezyon üzerindeki etkisinin belirgin olmadığını söylemek yanlış olmayacaktır. Zira fiber uzunluğu ve oranlarındaki değişim ile kohezyon üzerinde sistematik bir artış ya da azalış gözlemlenememiştir. Hatta çoğu durumda fiber artışının kohezyonu olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Bu durum şu şekilde açıklanmıştır; genel anlamda özellikle killi zeminlerde zemin daneciklerini veya benzeri parçacıkları bir arada tutan kuvvete kohezyon denmektedir. Kohezyon, daneler arası sürtünmeden bağımsız bir kaya veya zeminin kayma dayanımının

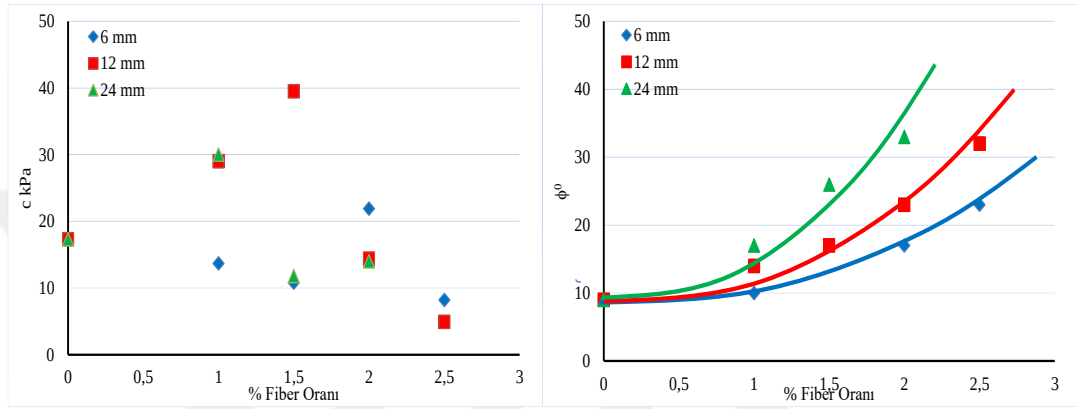
bileşenidir. Söz konusu bileşen gerçek ve görünür olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Gerçek kohezyon daha çok ileri derecede aşırı konsolide zeminlerde elektrostatik kuvvetlerin etkisi ile veya Fe_2O_3 , $CaCO_3$, $NaCl$, vb. ile çimentolamayla oluşur. Buna karşın görünür kohezyon daha çok zeminlere has bir özellik olup elektrostatik kuvvetlerin etkisiyle, negatif kılcal basınçlar sonucu oluşan emme ile oluşmaktadır. Görünür denmesinin sebebi zemin içindeki su muhtevasına bağlı olarak kohezyonun büyüklüğünde meydana gelen önemli değişikliklerdir. Bu tanımlamadan anlaşılacağı üzere killi zemin üzerine katılan bazalt fiberin zeminin kohezyonu üzerinde etkisi olmayacağı gibi kil partiküllerinin yerini nötr fiber liflerinin almasının kohezyon direncini azaltmasını beklemek yanlış olmayacaktır.

Yapılan deney sonuçlarına göre Şekil 5.6.'da görüldüğü üzere bazalt fiber oranı ve boyu arttıkça kayma direnci açısından doğrusal olmayan bir artış gözlemlenmiştir. Kayma direnci açısı (ϕ) için en büyük oran değerleri; 12 mm uzunluğunda %2,5 fiber katkılı kil numunesinde 3,56 ve 24 mm uzunluğunda %2 fiber katkılı kil numunesinde 3,67 olduğu anlaşılmıştır. Buna karşın 24 mm uzunluğunda %2,5 fiber katkılı zemin numunesinde kayma direnci açısının radikal bir biçimde düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum kil içine katılan fiberin belli bir oran ve uzunluğundan sonra kayma direnci üzerindeki olumlu etkisinin son bulduğu optimum bir değere sahip olduğunu işaret etmektedir.

Deney sonuçlarına ilave olarak, kohezyon değerinde bazalt fiber uzunluğuna bağlı olarak farklı bazalt fiber oranlarında pik değerler olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada kohezyon değeri için etkili bazalt fiber-zemin kolonu/ağı şu şekildedir; 6 mm fiber uzunluğunda çalışılmış numunelerde kohezyon değeri %2 fiber oranında pik yapmış iken, 12 mm fiber uzunluğunda çalışılmış numunelerde kohezyon değeri %1,5, 24 mm fiber uzunluğunda çalışılmış numunelerde ise kohezyon değeri %1 fiber oranında pik yapmıştır. Bazalt fiberin güçlendirme mekanizmasında; bazalt fiber ve zemin arasındaki etkileşim, bazalt fiber oranı ve boyu oldukça etkilidir. Bazalt fiber ve zemin numunesi fiber-zemin kolonlarını oluşturur ve etkileşimleri halinde yüzey kuvveti oluşur. Bazalt fiber yoğunluğu az ve uzunluğu kısa olduğunda ise etkili ara yüz ve

fiber-zemin ağı oluşamaz. Bu da fiberlerin kolaylıkla zeminden ayrılmasına sebep olmaktadır.

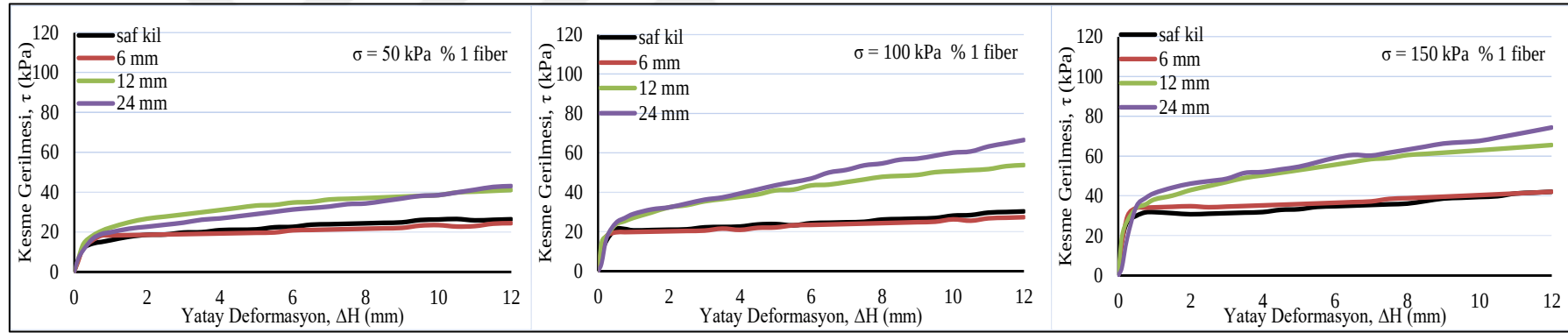
Öte yandan fazla fiber yoğunluğu ve uzunluğu da fiberlerin, elektrostatik etkileşimden ötürü zemin numunesi içerisinde kümeler halinde topaklaşmasına sebep olup, gerilme aktarımı açısından zayıf alanlar oluşmasına neden olmaktadır (Gao ve ark., 2015).



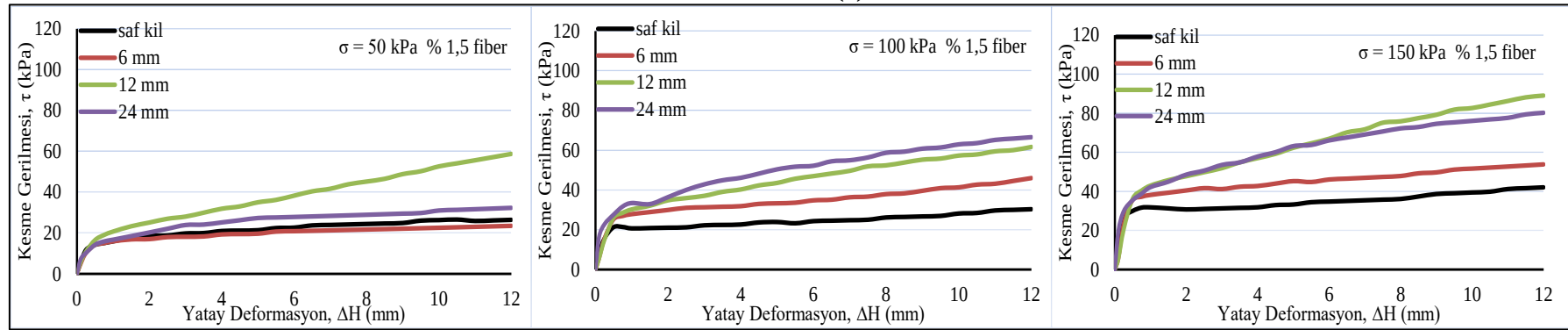
Şekil 5.6. c ve ϕ değerlerinin grafiksel gösterimi.

5.2. Kesme Gerilmesi ve Yatay Deformasyon Arasındaki İlişki

Şekil 5.7.'de kesme gerilmesi ve yatay deformasyon arasındaki ilişki farklı fiber boyları ve farklı düşey gerilmeler altındaki davranışları göz önüne alınarak grafiklendirilmiştir. Genel olarak 24 mm'lik fiber boyunda diğer fiberlere oranla bir artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu artışın kesme esnasında zemin içerisindeki fiberin kesmeye karşı gösterdiği direnç ile uzamaya başlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sebeple bazalt fiberin tıpkı çelik gibi akma uzaması gösterdiği varsayılabilir.

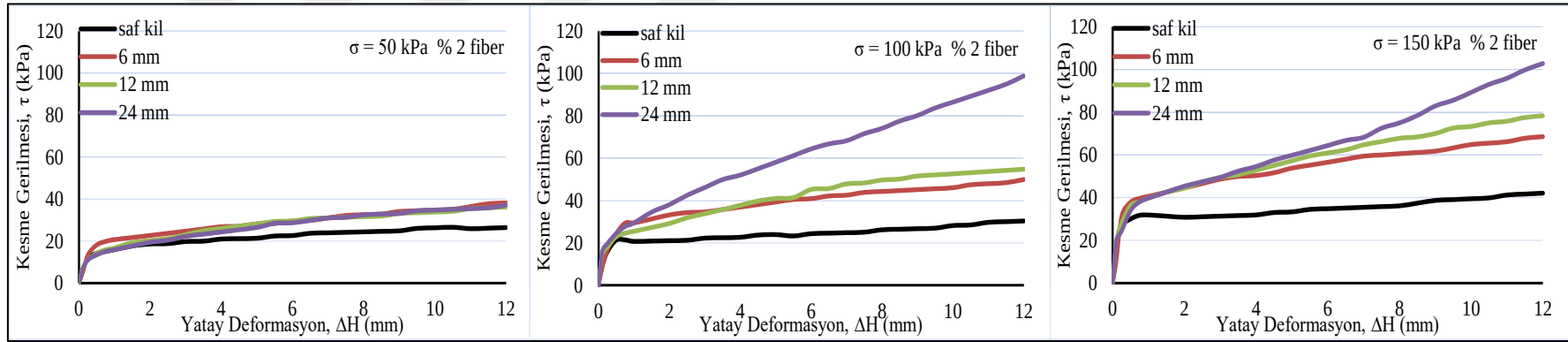


(a)

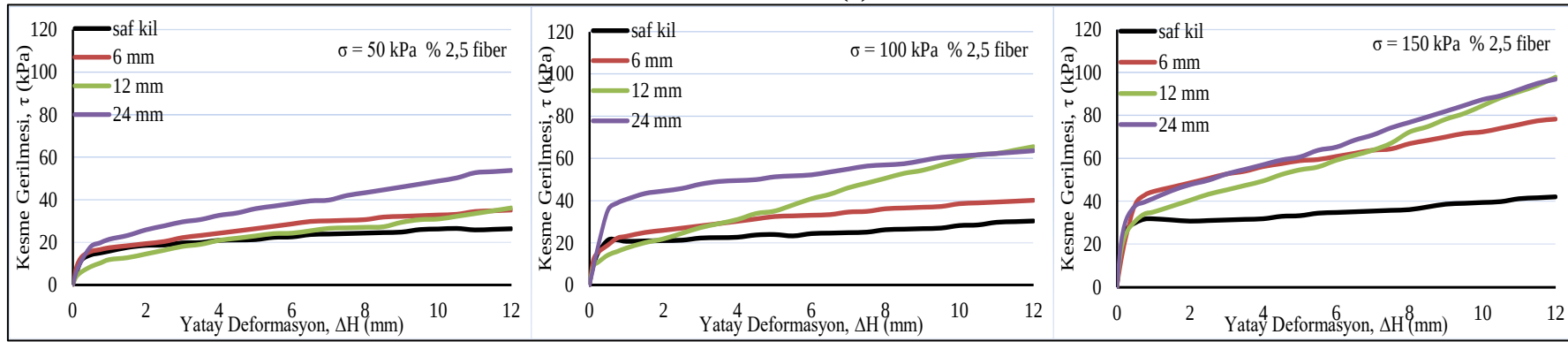


(b)

Şekil 5.7. Kesme gerilmesi ve yatay deformasyona ait grafikler (a) %1 fiber oranı, (b) %1,5 fiber oranı, (c) %2 fiber oranı, (d) %2,5 fiber oranı.



(c)

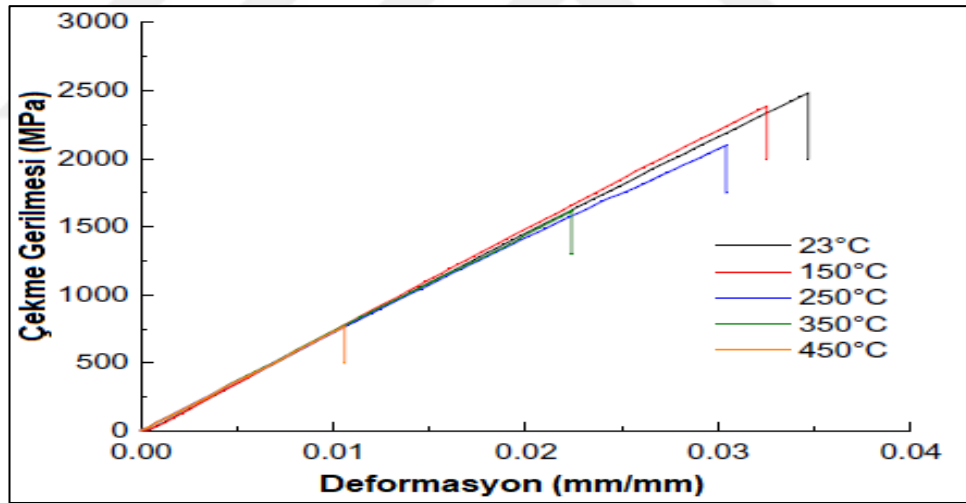


(d)

Şekil 5.7. (Devamı).

5.3. %4 Deformasyonda Kesme Gerilmesi ve Fiber Oranı Arasındaki İlişki

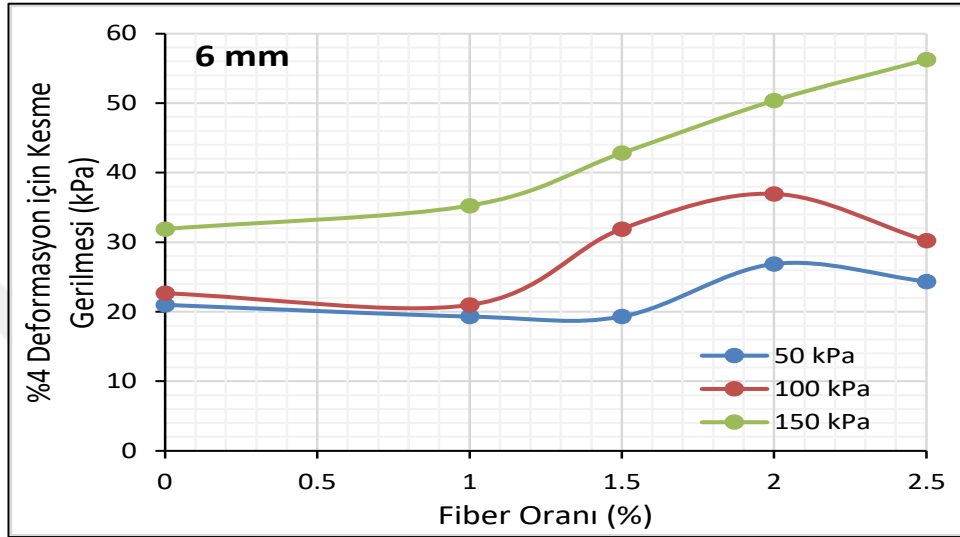
Şekil 5.8.'de özellikle yüksek normal gerilmelerde fiber boyu arttıkça deformasyon ile birlikte artan bir dayanım grafiği ortaya çıkmaktadır. Bu durum şu şekilde açıklanmıştır; bazalt fiber yüksek mekanik özellikler (gerilme direnci ve elastik modülü cam elyafından %15-20 daha yüksek) sunan bir mineral elyafıdır. Yüksek gerilmelerde bazalt fiberler daneler arasında sıkışmakta ve uzun fiberler artan deformasyonla birlikte bir nevi çekme gerilmesine maruz kalmaktadırlar. Benzer dayanım grafikleri literatürde tek bir bazalt lifinin deformasyon-çekme gerilmesi grafiklerine de yansımaktadır. Bhat ve ark. (2018) yapmış oldukları çalışmada farklı sıcaklıklarda tek bir bazalt lifini çekme deneyine tabi tutmuşlardır. Buradan anlaşılacağı üzere kopma için gerilme sıcaklık arttıkça düşmesine rağmen hemen hepsi son dayanımlarına ulaşmadan önce deformasyon ile birlikte nerdeyse lineer bir dayanım sunmaktadırlar.



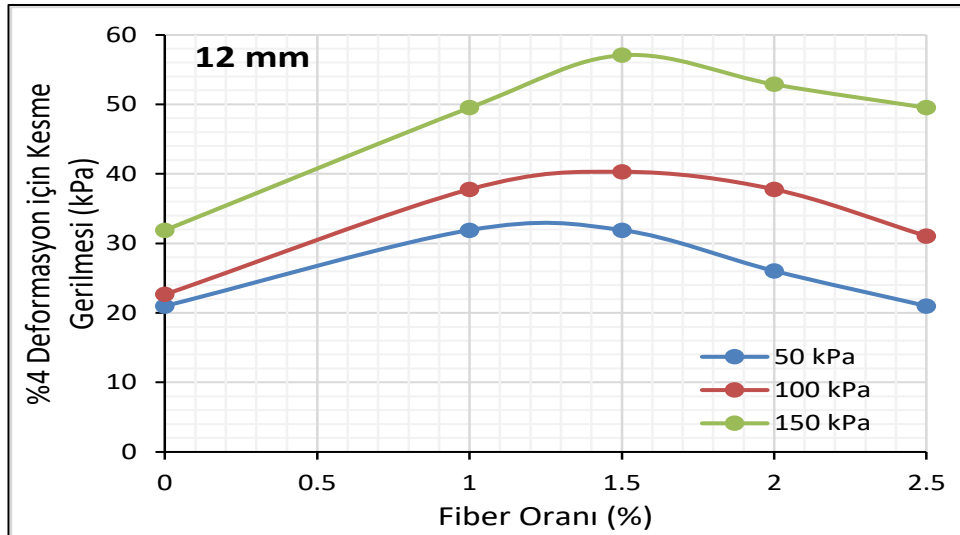
Şekil 5.8. Farklı sıcaklıklarda ısıtmanın ardından tek bazalt lifi için çekme gerilmesi-gerinim eğrileri (Bhat ve ark., 2018).

Buradaki gibi kesme sırasında bazalt liflerinin çekme etkisini görmek yerine zemin ile beraber dayanım ilişkisini anlama bakımından düşük deformasyonlardaki dayanımlarına bakıldığında daha anlamlı sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Bunu sağlamak için %4 deformasyondaki dayanımlar incelenmiştir. %4 deformasyon değeri kesme esnasında grafik üzerinde dirseklenmenin meydana gelmesinden sonraki deformasyondur.

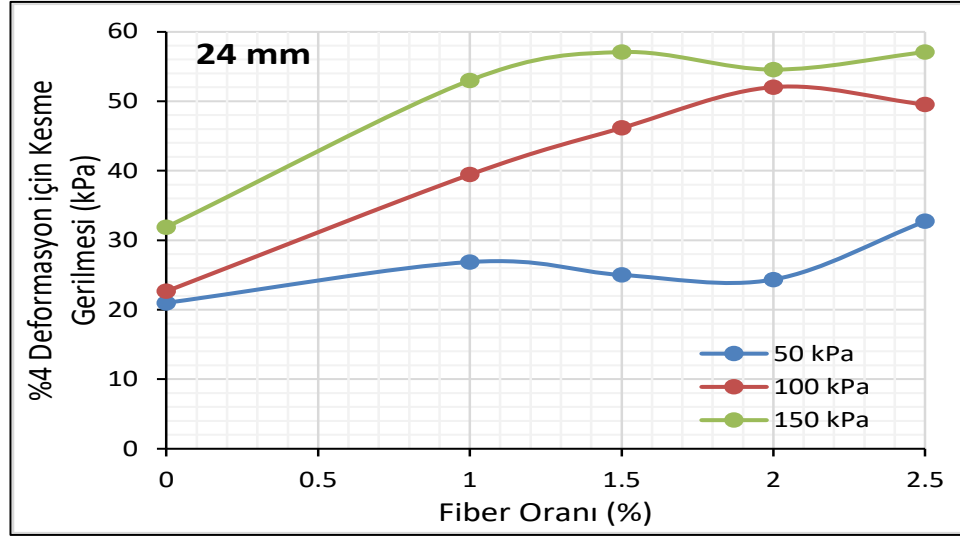
Dirseklenme şekil ve biçimlerinin meydana gelişi birbirinden farklıdır, bunun sebebinin de numune içine rastgele dağıtılmış bazalt fiberlerin kesme esnasındaki davranışından kaynaklandığı düşünülmektedir. %4'lük deformasyonda aynı düşey gerilme altında farklı boy ve oranlardaki bazalt fiber katkılı numunelerin kesme gerilmesi değerleri Şekil 5.9., Şekil 5.10. ve Şekil 5.11.'de verilmiştir.



Şekil 5.9. 6 mm bazalt için %4 deformasyona denk gelen kesme gerilmesi- fiber oranı ilişkisi.



Şekil 5.10. 12 mm bazalt için %4 deformasyona denk gelen kesme gerilmesi- fiber oranı ilişkisi.



Şekil 5.11. 24 mm bazalt için %4 deformasyona denk gelen kesme gerilmesi- fiber oranı ilişkisi.

Bu grafiklere göre 12 mm'lik bazalt takviyesi ile güçlendirilen zeminin tüm normal gerilme koşulları altında daha anlamlı sonuçlar verdiği anlaşılmıştır.

BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tezinde yapılan deneysel çalışmalar neticesinde bazalt fiber katkısının kil zeminlerin kayma direnci parametrelerine etkisi araştırılmıştır. Doğal ve bazalt fiber katkılı numunelerin kullanıldığı bu çalışmada 39 adet numune üzerinde Kesme Kutusu deneyleri tatbik edilmiştir. Bazalt fiberler farklı boy ve oranlarda zemin numunesine ilave edilerek kayma direnci parametrelerindeki değişim incelenmiştir.

Deneysel çalışmanın ilk aşamasında kil zemin numunesine 6 mm, 12 mm ve 24 mm boyundaki bazalt fiberler ağırlıkça %0, %1, %1,5, %2 ve %2,5 oranında ilave edilerek bulamaç hale getirilmiştir. 1 hafta ön konsolidasyona tabi tutulan numuneler deney hücresinden alınarak kesme kutusunda 1'er gün daha konsolide edilmiş ve sırası ile kesilmiştir.

Fiber uzunluğu ve oranlarındaki değişim ile kohezyon (c) üzerinde sistematik bir artış ya da azalış gözlemlenememiştir. Bu durum şu şekilde açıklanabilir; kohezyon gerçek ve görünür olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Gerçek kohezyon daha çok ileri derecede aşırı konsolide zeminlerde elektrostatik kuvvetlerin etkisi ile veya Fe_2O_3 , $CaCO_3$, $NaCl$, vb. ile çimentolamayla oluşur. Buna karşın görünür kohezyon daha çok zeminlere has bir özellik olup elektrostatik kuvvetlerin etkisiyle, negatif kılcal basınçlar sonucu oluşan emme ile oluşmaktadır. Görünür denmesinin sebebi zemin içindeki su muhtevasına bağlı olarak kohezyonun büyüklüğünde meydana gelen önemli değişikliklerdir. Bu tanımlamadan anlaşılacağı üzere killi zemin üzerine katılan bazalt fiberin zeminin kohezyonu üzerinde etkisi olmayacağı gibi kil partiküllerinin yerini nötr fiber liflerinin almasının kohezyon direncini azaltmasını beklemek yanlış olmayacaktır.

Deneysel çalışmalar neticesinde bazalt fiber katkısı ile kohezyon değerindeki en büyük değişim oranı 12 mm uzunluğunda %1,5 fiber katkılı numunede 2,28 olurken, kayma direnci açısı ϕ için en büyük değişim oranı değerleri; 12 mm uzunluğunda %2,5 fiber katkılı kil numunesinde 3,56 ve 24 mm uzunluğunda %2 fiber katkılı kil numunesinde 3,67 olmuştur. Ayrıca bazalt fiber oranı ve boyu arttıkça kayma direnci açısından doğrusal olmayan bir artış gözlemlenirken, kohezyon değerinde ise bazalt fiber uzunluğuna bağlı olarak farklı bazalt fiber oranlarında pik değerler olduğu gözlemlenmiştir. Şöyle ki; 6 mm fiber uzunluğunda çalışılmış numunelerde kohezyon değeri %2 fiber oranında pik yapmış iken, 12 mm fiber uzunluğunda çalışılmış numunelerde kohezyon değeri %1,5, 24 mm fiber uzunluğunda çalışılmış numunelerde ise kohezyon değeri %1 fiber oranında pik yapmıştır. Bu durum fiber - zemin arasındaki etkileşim, fiber boyu ve fiber oranı (numune içerisindeki fiber yoğunluğu) ile açıklanmaktadır.

24 mm'lik fiber boyunda farklı düşey gerilmeler altında diğer fiberlere kıyasla daha fazla uzamaların meydana geldiği görülmüş, bu uzamanın fiberin kesmeye karşı gösterdiği direnç ile uzamaya başlamasından kaynaklandığı ve tıpkı çelik gibi akma uzaması gösterdiği varsayılmıştır.

Deneysel çalışmalar esnasında bazalt fiber oranı ve boyu arttıkça numunelerin deney hücresinden kesme kutusuna alınması aşamasında yer yer bazalt fiber topaklanmalarının meydana geldiği ve bunun sonucunda rastgele dağıtılan bazalt fiberin zemin numunesi ile homojen olarak karışmakta zorlandığı gözlemlenmiştir.

3 farklı normal gerilme altında kesme kutusu deneyi yapılan bu tür çalışmalarda deney sonuçlarının daha doğru değerlendirilmesi amacıyla benzer çalışmaların en az 4 farklı normal gerilme altında yürütülmesi ve ayrıca farklı bazalt fiber boy ve oranlarının kullanılması önerilir.

KAYNAKLAR

- Akbulut, S., Arasan, S., Kalkan, E. 2007. Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers. Article in Applied Clay Science.
- Alp, M. S. 2019. Jüt ve keten fiber takviyeli kompozitlerin frezelenme performansının belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi.
- Aral, M. 2006. Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı bir optimum tasarım. Yüksek Lisans Tezi.
- Aruntaş, H. Y. 2006. Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 21, No 1, 193-203.
- Ayininuola, G. M. and Udoh, E. G. 2018. Geotechnical properties of flax fiber stabilized soil. Journal of Earth Science and Engineering, 8:75-82, Nigeria.
- Beycioğlu, A., Aruntaş, Y. 2014. Bazalt lifli donatının yüksek dayanımlı betondaki aderans performansı. Journal of Engineering and Technological Sciences, (2014/1).
- Bhat, T., Fortomaris, D., Kandare, E. ve Mouritz, A. P. 2018. Properties of thermally recycled basalt fibres and basalt fibre composites. Journal of Material Science, Vol. 53, 1933–1944. <https://doi.org/10.1007/S10853-017-1672-7>.
- Bilge, T. 2011. Yüksek fırın cürufu katkısının kil zeminlerin stabilizasyonuna etkisinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi.
- 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.
- Bilici, H., Okur, D. V., Türköz, M., Savaş, H. 2020. Kil zeminin dayanımı üzerinde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılarının etkisi ve karşılaştırmalı analizi. BEÜ Fen Bilimleri Dergisi (BEU Journal of Science), 9 (2), 910-919.
- Carmel, V., Vinu, T. 2015. Stabilization of soft clay using lime and jute fibres. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Conference Proceedings, ISSN: 2278-0181 Published By, www.ijert.org Ncrace-2015.

- Çakır, M. 1999. Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Çimen, Ö., Keskin, S. N., Şimşek, S., Kalay, E. 2010. Yüksek plastisiteli bir kilin mühendislik özelliklerine pomza ve mermer tozunun etkisi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi, İstanbul Kültür Üniv., İstanbul.
- Çitoğlu, S., Bayraktar, O. Y. 2018. Atık mermer tozu ve inşaat sektöründeki kullanımı ile ilgili çalışmalar. ISAS 2018-Winter Sempozyumu, Samsun.
- Develioğlu, İ., Pulat, H. F. 2018. Yüksek fırın cürufunun geoteknik özellikleri ve taşıma kapasitesi performansının incelenmesi. Pamukkale Üniv. Müh. Bilim Derg, 24(3), 433-438.
- Diallo, M. L., Unsever, Y. S. 2019. Stabilization of clay soils using fly ash. Black Sea Journal of Engineering and Science, 2(3): 81-87.
- Diyar, İ. H., Çabalar, A. F., Akbulut, N. 2015. Bir kilin atık granit kırığıyla iyileştirilmesi, 6. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- 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, Cilt 2, Sayı 1, 41-44.
- Eskişar, T., Altun, S. 2015. Fiber donatılı ince taneli zeminlerin mekanik davranışlarının serbest basınç deneyleri ile incelenmesi. 6. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Fırat, S., Cömert, A.T. 2011. Uçucu kül, kireç ve çimento ile iyileştirilmiş kaolinde kür süresinin CBR üzerine etkileri. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi, 26 (4): 719- 730.
- Ghazavi, M., Roustaie, M. 2010. The influence of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay. Cold Regions Science and Technology, 61:125–131.
- Gisymol, P. G., Ramya, K. 2017. A study on the effect of basalt fiber in organic soil. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), E-ISSN: 2278-1684, P-ISSN: 2320-334x, Volume 14, Issue 4 Ver. V (Jul. - Aug.), Pp 13-17.
- Görgüna, B. ve Uralb, N. 2015. Mermer atığının geoteknik mühendisliğinde kullanılması. 2nd International Sustainable Buildings Symposium.

- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., Mordoğan H. 2005. Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları. Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, İmce2q05. İzmir.
- Güllü, H., Khudir, A. 2014. Effect of freeze–thaw cycles on unconfined compressive strength of fine-grained soil treated with jute fiber, steel fiber and lime. *Cold Regions Science and Technology*, 106–107,55–65.
- Günaydın, O., Güçlüer, K. 2018. Bazalt lifi katkılı betonların mekanik özelliklerinin araştırılması. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt: 5, No: 2, (416-424).
- Güney, Y., Aydılek, A. H., Demirkan, M. 2006. Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway subbases. *Waste Management* 26:932–945.
- Hazırbaşı, K., Gullu, H. 2010. California bearing ratio improvement and freeze–thaw performance of fine-grained soils treated with geofiber and synthetic flui. *Cold Regions Science and Technology*, 63:50–60.
- Hejazi, S. M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S. M., Zadhoush, A., Et Al. 2012. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, 30:100–116.
- Karaman, M., Ecemiş, N. 2017. Kum - lastik kırpıntı çapının ve karışım oranının sıvılaşma potansiyeline etkisinin sarsma tablası deneyleri ile incelenmesi. 7. Geoteknik Sempozyumu, İstanbul.
- King, M. F. L., Srinivasan, V., and Purushothaman, T. 2014. Basalt fiber: an ancient material for innovative and modern application. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 22 (2): 308-312, ISSN: 1990-9233.
- Kumar, A., Walia, B. S., Mohan, J. B. 2006. Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay, *Construction and Building Materials* 20:1063–1068.
- Kumar, S., Tabor, E. 2003. Strength characteristics of silty clay reinforced with randomly oriented nylon fibers.
- Kurt, G. 2006. Lif içeriği ve su/çimento oranının fibrobetonun mekanik davranışına etkileri.
- Lei Gao, Guohui Hu, Nan Xu, Junyi Fu, Chao Xiang and Chen Yang. 2015. Experimental study on unconfined compressive strength of basalt fiber reinforced clay soil. Hindawi Publishing Corporation *Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2015, Article ID 561293, 8 Pages.
- Mahmutluoğlu, B., Bağrıaçık, B. 2020. Killi zeminlerin donma-çözülme davranışlarında cam atık çamurunun etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(3), Ss. 783-795.

- Mitchell, J. K. 1981. Soil improvement: state-of-the-art, session 12. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden.
- Ndepete, C. P. 2017. Bazalt fiber katkısının siltli zeminlerde kayma direncine etkisi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geoteknik Anabilim Dalı, Doktora Tezi.
- Ndepete, C. P. And Sert, S. 2017. Experimental investigation of mechanical behavior of basalt fiber reinforced saturated silty soil, Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, Cilt 6 (ICOCEE 2017 Özel Sayı), 341-348.
- Ocakbaşı, P. 2019. Bazalt Fiber Katkısının Killi Zeminlerin Drenajsız Kayma Direncine Etkisi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geoteknik Anabilim Dalı, Yüksek lisans Tezi.
- Oltulu, M., Oktan, H. 2019. Farklı görünüm oranlı bazalt liflerin betonun mekanik özelliklerine etkisi. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9(2): 870-879.
- Oliveira Júnior, A.I., Jucá, J.F.T., Ferreira, J.A., Guilherme, L.C. 2019. Geotechnical Behavior And Soil-Fiber Interaction Of Clayey Soil Mixed With Randomly Dispersed Coconut Fibers. Soils And Rocks, São Paulo, 42(2): 127-138, May-August, 2019.
- Önalp, A., Sert, S. 2016. Geoteknik Bilgisi III Bina Temelleri, Güncelleştirilmiş 3. Baskı, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Parmar, S., Mankodi, H. 2016. Basalt fiber: newer fiber for frp composites, International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research (IJETER), Volume 4, Issue 7, July.
- Rajagopal, S. Et Al. 2017. A review on performance of coir fiber reinforced sand. International Journal of Engineering and Technology (IJET), February.
- Seals, R. K. (1977). Properties of bottom ash/boiler slag and fly ash. Short Course. Technology and Utilization of Power Plant Ash, P.59.
- Segetin, M., Jayaraman, K., Xu, X. 2007. Harakeke reinforcement of soil–cement building materials: manufacturability and properties. Building And Environment, 42:3066–3079.
- Sharma, Y., Purohit, M., Sharma, S. 2017. Improvement of soil properties by using jute fibre as soil stabilizer, American Journal of Engineering Research (AJER), E-ISSN: 2320-0847, P-ISSN: 2320-0936, Volume-6, Issue-10, Pp-123-129.

- Soundara, B., Kumar, S. K. 2015. Effect of fibers on properties of clay. International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS), ISSN: 2394-3661, Volume-2, Issue-5.
- Türedi, Y., Örnek, M., Bal, B. B., Işık, A.O. 2017. Çelikhane cürufu katkısının CBR sonuçlarına etkisinin araştırılması. 7. Geoteknik Sempozyumu, İstanbul.
- URL-1<<https://ezinearticles.com/5227881>>, Erişim Tarihi: 30.12.2020.
- URL-2<<http://www.mercanmadencilik.com>>, Erişim Tarihi: 17.01.2021.
- URL-3< <http://www.bilgimanya.com>>, Erişim Tarihi: 17.01.2021.
- URL-4< <https://www.acunn.com>>, Erişim Tarihi: 17.01.2021.
- URL-5<<https://www.besoglu.com/>>, Erişim Tarihi: 17.01.2021.
- Yarbaşı, N. 2018. Mermer tozu ve atık lastik ile iyileştirilen düşük plastisiteli killi zeminlerin dayanım özellikleri. Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev. Derg, 4(2): 162-170, DOI: 10.21324/Dacd.412489.
- Yılmaz, F. 2016. Zemin stabilizasyonunda uçucu kül kullanımı. Isem2016, 3rd International Symposium on Environment and Morality, Alanya.
- Zaimoğlu, A. S. 2010. Freezing–thawing behavior of fine-grained soils reinforced with polypropylene fibers, Cold Regions Science and Technology, 60:63–65.
- Zaimoğlu, A. Ş., Yetimoğlu, T., Çalık, Y., Akbulut, R. K. 2012. Ayrık polimer liflerle rastgele donatılı ince daneli zeminlerde donatı uzunluğunun donma-çözülme davranışına etkisi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği On dördüncü Ulusal Kongresi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Zorluer, İ., Usta, M. 2003. Zeminlerin atık mermer tozu ile iyileştirilmesi. Türkiye IV Mermer Sempozyumu (Mersem, 2003) Bildiriler Kitabı.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Selen Terzi

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği	2017
Lise	Bolu Atatürk Anadolu Lisesi	2012

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2021-Halen	Balorman Orman Ürünleri San ve Tic. A.Ş.	Proje Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce