

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BAZALT FİBERİN
ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE KULLANIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muharrem KÜÇÜKOSMANOĞLU

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Sedat SERT

Haziran 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BAZALT FİBERİN
ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE KULLANIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muharrem KÜÇÜKOSMANOĞLU

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK

Bu tez ^{14.06}.../.../2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Doç. Dr.
Sedat SERT
Jüri Başkanı


Doç. Dr.
Ertan BOL
Üye


Dr. Öğr. Üyesi
Zehra Şule GARİP
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.

Muharrem KÜÇÜKOSMANOĞLU

14.06.2019

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitiminin başından sonuna kadar değerli bilgi ve laboratuvar tecrübelerinden yararlandığım, hiçbir konuda bilgi ve desteğini esirgemeyen, çalışmanın her merhalesinde yardımlarıyla yanımda bulunan, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren danışman hocam Doç. Dr. Sedat SERT'e göstermiş olduğu sonsuz sabırdan dolayı teşekkür ederim.

Yüksek Lisans çalışmamı destekleyen Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2012-50-01-032), bazalt fiber malzemesi ile çalışmamızı öneren ve malzeme temininde yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Ahmet BEYCIÖĞLU'na ve ayrıca bazalt fiber malzemesini bedelsiz olarak tarafımıza sağlayan Spinteks Tekstil İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ne teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmaları esnasında yardımlarını esirgemeyen Teknikerler Recep EYÜPLER ve Sebahattin İŞ'e teşekkür ederim.

Eğitimim dışında yaşamımın her döneminde de yanımda olan, şahsiyetli bir birey olarak yetişmem için çaba sarf eden, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme, sevgili eşime ve dostlarıma şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
KATKI MALZEMELERİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRME VE FİBER KATKISI.....	3
2.1. Fiber Türleri	4
2.2. Doğal Fiberlere Örnekler	5
2.3. Yapay Fiberler	6
2.4. Geotekstil, Lif ve Diğer Katkı Maddeleri ile Zemin İyileştirme Çalışmaları.....	7
BÖLÜM 3.	
BAZALT VE BAZALT FİBERLER.....	13
3.1. Bazalt.....	13
3.2. Bazalt Fiber	15
3.2.1. Bazalt fiberlerin üretimi	15
3.3. Bazalt Fiberlerin Özellikleri.....	16
3.3.1. Mekanik özellikleri ve dayanıklılığı	16
3.3.2. Kimyasal direnç.....	16

3.3.3. Korozyon ve mantar direnci	16
3.3.4. Ekolojik yapı	17
3.4. Bazalt Lif Ürünleri	17
3.5. Bazalt Fiberin Betonda Kullanımı.....	19
3.6. Bazalt Fiber Katkısı ile Zemin İyileştirmesi Örnekleri	21

BÖLÜM 4.

MALZEMELER VE METOT	23
4.1. Malzemeler	23
4.1.1. Kil zemin	23
4.1.2. Bazalt fiber	24
4.2. Yöntem	25
4.2.1. Fiziksel deneyler	26
4.2.1.1. Kıvam limiti deneyleri.....	26
4.2.1.2. Özgül ağırlık deneyi	29
4.2.1.3. Elek analizi, hidromete deneyleri.....	30
4.2.2. Kompaksiyon deneyleri	31
4.2.2.1. Standart Proktor deneyi	31
4.2.2.2. Modifiye Proktor deneyi	33
4.2.3. Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi	34
4.3. Kil Zeminin Kimyasal Özellikleri.....	36
4.3.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	36

BÖLÜM 5.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	38
5.1. Kil ve Bazalt Fiberin Mikro Yapı Özellikleri	38
5.2. Numunelerde Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyi.....	40
5.2.1. Doğal numunede Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi.....	40
5.2.2. Doğal suya doymunede Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi.....	41
5.3. Bazalt Fiber Katkılı Numunelerde (CBR) Deneyleri.....	41

5.3.1. 6 mm boyunda bazalt fiber katkılı numunelerde	
(CBR) deneyleri	41
5.3.1.1. 6 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,05	
oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi.....	41
5.3.1.2. 6 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,10	
oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi.....	42
5.3.1.3. 6 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,15	
oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi.....	42
5.3.1.4. 6 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,20	
oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi.....	42
5.3.1.5. 6 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %2,00	
oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi.....	43
5.3.2. 12 mm boyunda bazalt fiber katkılı numunelerde	
(CBR) deneyleri	43
5.3.2.1. 12 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,05	
oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi.....	43
5.3.2.2. 12 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,10	
oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi.....	43
5.3.2.3. 12 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,15	
oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi.....	44
5.3.2.4. 12 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,20	
oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi.....	44
5.3.3. 24 mm boyunda bazalt fiber katkılı numunelerde	
(CBR) deneyleri	45
5.3.3.1. 24 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,05	
oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi.....	45
5.3.3.2. 24 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,10	
oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi.....	45
5.3.3.3. 24 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,15	
oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi.....	46
5.3.3.4. 24 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,20	
oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi.....	46
5.3.3.5. 24 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,25	
oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi.....	46
5.3.3.6. 24 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,50	
oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi.....	47

5.3.3.7. 24 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %1,00 oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi.....	47
5.3.3.8. 24 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %1,50 oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi.....	47
5.3.3.9. 24 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %2,00 oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi.....	48
5.4. Kil Zeminde Bazalt Fiber Katkısının Şişmeye Etkisi	48
5.5. Kil Zeminde Bazalt Fiber Katkısının Taşıma Gücü Oranına Etkisi.....	51
5.5.1. Kil zeminde bazalt fiber oranının taşıma gücü oranına etkisi....	51

BÖLÜM 6.

SONUÇ VE ÖNERİLER	59
KAYNAKÇA	61
ÖZGEÇMİŞ	65

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Düzeltilmiş alan
A ₀	: Numune ilk alanı
c	: Kohezyon
CBR	: Kalifornia Taşıma Oranı (California Bearing Ratio)
CD	: Konsolidasyonlu drenajlı (Consolidated drained)
CH	: Yüksek plastisiteli kil
CL	: Düşük plastisiteli kil
CU	: Konsolidasyonlu drenajsız (Consolidated undrained)
e	: Boşluk oranı
G _s	: Özgül ağırlık
H	: Numune yüksekliği
I _p	: Plastisite indisi
M ₁	: Kabın kütlesi
M ₂	: Kap + yaş numune kütlesi
M ₃	: Kap + kuru numune kütlesi
MDD	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık (Maximum dry density)
n	: Porozite
N	: Darbe sayısı
OMC	: Optimum su muhtevası (Optimum moisture content)
P	: Yük
PE	: Polietilen
PET	: Polyester
PP	: Polipropilen
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
S _r	: Doğunluk derecesi

- TSE : Türk Standartları Enstitüsü
- UCS : Serbest basma dayanımı (Unconfined compressive strength)
- USCS : Birleştirilmiş Sınıflandırma Sistemi (Unified Soil Classification System)
- UU : Konsolidasyonsuz drenajsız (Unconsolidated undrained)
- UUS : Konsolidasyonsuz drenajsız deneyde dayanım
- V : Numune hacmi
- V_e : Boşluk hacmi
- V_s : Dane hacmi
- w : Su muhtevası
- w_L : Likit limit
- w_{opt} : Optimum su muhtevası
- w_p : Plastik limit
- W_s : Kuru örnek ağırlığı
- W_w : Su ağırlığı
- ϵ : Düşey birim boy değişimi
- ϕ : Kayma direnci açısı
- γ_{kmak} : Maksimum kuru birim hacim ağırlık
- γ_w : Suyun birim hacim ağırlığı
- σ : Toplam normal gerilme
- τ_{max} : Kayma direnci

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Kıyılmış bazalt fiberler	18
Şekil 3.2. Bazalt ip	18
Şekil 3.3. Bazalt donatı çubukları	19
Şekil 4.1. Deneyleerde kullanılan kil zemin	23
Şekil 4.2. Kil zeminin dane dağılım eğrisi	24
Şekil 4.3. Deneyleerde kullanılan bazalt fiber örnekleri.....	24
Şekil 4.4. Casagrande ve koni düşürme yöntemi ile likit limitin bulunması	27
Şekil 4.5. Casagrande cihazı ile yapılan likit limit deney grafiği	28
Şekil 4.6. Düşen koni ile yapılan likit limit deney grafiği	29
Şekil 4.7. Kilin TS 1500/2000 plastisite kartındaki yeri	29
Şekil 4.8. Özgül ağırlık deneyi aşamaları	30
Şekil 4.9. Dane çapı dağılımının bulunması, hidrometre ve elek analizi deneyleri	31
Şekil 4.10. Standart kompaksiyon deneyi	32
Şekil 4.11. Standart kompaksiyon deneyi grafiği	33
Şekil 4.12. Modifiye proktor deneyi yapılışı	34
Şekil 4.13. Modifiye proktor deneyi yapılışı	34
Şekil 4.14. CBR deney aşamaları 1	35
Şekil 4.15. CBR deney aşamaları 2.....	36
Şekil 4.16. Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarındaki SEM analizi cihazı	37
Şekil 5.1. Kil zeminde bazalt liflerinin mikroskopik gözlemi ve düzenlenmesi ...	38
Şekil 5.2. SEM analizi: kil zeminin mikro yapısı	39
Şekil 5.3. SEM analizi: bazalt fiber mikro yapısı (a) X100, (b) X5000	39
Şekil 5.4. 6 mm boyutlarındaki bazalt fiber katkıli zeminin şişme değerleri grafiği	49

Şekil 5.5. 12 mm boyutlarındaki bazalt fiber katkıli zeminin şişme değerleri grafiği	49
Şekil 5.6. 24 mm boyutlarındaki bazalt fiber katkıli zeminin şişme değerleri grafiği	50
Şekil 5.7. 6-12-24 mm boyutlarındaki bazalt fiber katkıli zeminin şişme değerleri grafiği	50
Şekil 5.8. 6-12-24 mm boyutlarındaki bazalt fiberin %0,05-%0,10-%0,15-%0,20 oranlarında katıldığı zeminin şişme değerleri grafiği	51
Şekil 5.9. Kuru ve doğgun kil zeminde CBR deneyinde yük - batma değerleri	53
Şekil 5.10. 6 mm bazalt fiber katkıli numunelerin CBR deneyinde yük - batma değerleri	54
Şekil 5.11. 12 mm bazalt fiber katkıli numunelerin CBR deneyinde yük - batma değerleri	55
Şekil 5.12. 24 mm bazalt fiber katkıli numunelerin CBR deneyinde yük - batma değerleri	57

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Fiber çeşitleri.....	4
Tablo 2.2. Değişik fiber çeşitlerine ait tipik özellikler.....	5
Tablo 2.3. Bazı cam liflerin tipik özellikleri	6
Tablo 2.4. Polimer liflerin özellikleri	7
Tablo 3.1. Türkiye bazaltlarının kimyasal bileşenleri (% ağırlıkça).....	14
Tablo 3.2. Bazalt elyafı ile diğer elyaf türlerinin karşılaştırması	17
Tablo 4.1. Kil zeminin fiziksel özellikleri.....	24
Tablo 4.2. Bazalt fiberin fiziksel ve mekanik özellikleri	25
Tablo 4.3. Hazırlanan numunelerde kil ve fiber ağırlığı, fiber boy ve oranları	26
Tablo 5.1. Bazalt fiberi oluşturan mineraller (SEM).....	40
Tablo 5.2. Bazalt fiber katkılı zeminin şişme değerleri tablosu.....	48
Tablo 5.3. CBR okumaları ve taşıma gücü oranları tablosu	52

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Kil, Şişme potansiyeli, Bazalt fiber, CBR.

Tarih boyunca artan nüfusla birlikte yeni yerleşim ihtiyacının ortaya çıkması ile geoteknik açıdan problemlili olan zeminler üzerinde bina, ulaşım, su yapıları vb. gibi yapıların inşa edilmesi kaçınılmaz olmuştur. Şişebilen zeminler bu geoteknik problemlere verilebilecek örneklerden birisidir. Özellikle şişebilen zeminler üzerinde inşa edilen hafif binalarda veya ulaşım yapılarında önemli mühendislik problemleriyle karşılaşılabilir. Eğer ortam zeminlerinin şişme basıncı, üzerine gelen yükten fazla ise söz konusu yapılarda aşırı deformasyona bağlı problemler ortaya çıkabilmektedir. Çeşitli katkı malzemelerinin ve özede geosentetiklerin zeminlerin şişebilirliğini azaltmak üzere kullanıldığı bilinmektedir.

Bu çalışmada, bir kil zeminin şişme değeri bazalt fiber kullanılarak azaltılması amaçlanmıştır. Öncelikle doğal zemin üzerinde fiziksel özellikler ve indeks özelliklerini belirlemek üzere deneyler yapılmıştır. Sonrasında optimum su muhtevasında hazırlanan zeminin şişme davranışı Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyi ile incelenmiştir. Daha sonra 6 mm, 12 mm ve 24 mm boylarındaki bazalt fiberin gene optimum su muhtevasındaki doğal zemine %2,0 - %1,5 - %1,0 - %0,20 - %0,15 - %0,10 ve %0,05 oranlarında rastgele karıştırılmasıyla elde edilen numunelerin şişme davranışı incelenmiştir. Deneyler sonrasında, bazalt fiberin zeminin şişme özelliğini azalttığı, ancak belli bir optimum noktadan sonra şişmenin doğal durumdan daha fazla olabildiği ortaya konmuştur.

USE OF BASALT FIBER IN SOIL IMPROVEMENT

SUMMARY

Keywords: Clay, Swelling potential, Basalt fiber, CBR.

Because new settlement needs arise along with the increasing population throughout the history, it has been inevitable to construct buildings on geotechnically problematic soils. Expansive soils are one of the examples that can be given to these geotechnical problems. Significant engineering problems can be encountered in light buildings or transportation structures, especially on expansive soils. If the swelling pressure of the soils is higher than the load on it, problems due to excessive deformation can occur in these structures. It is known that various additives and in particular geosynthetics are used to reduce the swelling potential of soils. In this study, it is aimed to reduce the swelling potential of a clay soil by using basalt fiber. Firstly, experiments were done to determine the physical properties and index properties on the natural soils. The swelling behavior of the soil, which was prepared in the optimum water content, was then examined by the California Bearing Ratio (CBR) test. Then the same procedure was carried out on the same soil mixed with basalt fibers of different lengths 6 mm - 12 mm and 24 mm at different percentages of %2.0 - %1.5 - %1.0 - %0.20 - %0.15 - %0.10 and %0.05 depending on the dry weight of the soil. Test results show that basalt fiber inclusion reduces the swelling potential of the soil, but that after an optimum value, swelling may be higher than the natural state.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Yaşamakta olduğumuz dünyamız, karşılaşılan problemler iyi tanımlanıp çözümlere yönelik doğru tespitler yapıldığı sürece, üzerinde can ve mal güvenliğimize zarar gelmeden hayatımızı ikame etmemize harika bir zemin sağlamaktadır. Ancak günümüzde hızlı bir şekilde artmaya devam eden nüfusla birlikte şehirleşme ve ihtiyaçların karşılanma problemlerine çözüm üretebilmek için, geoteknik açıdan problemlili olan zeminler üzerinde endüstri yapıları, çok katlı binalar, ulaşım, konut, su yapıları vb. gibi yapıların inşa edilmesi kaçınılmaz olmuştur.

Zeminlerin iyileştirilmesinde; kireç, uçucu kül ve metal cüruf gibi malzemeler kimyasal stabilizasyon için kullanılırken geotekstil, geogrid, geonet, geocell, geomembran ve son zamanlarda polipropilen, polyester ve kopolimer gibi polimerler ve fiberler de katkıli-donatılı yöntemler olarak geoteknik mühendisliğinin ilgi alanına girmiştir (Çetin, 2011).

Lif türlerinin kullanımı 3500 yıl öncesine kadar giden bir tarihe sahiptir. Günümüze bakıldığında beton yapılarda betonun dayanımını arttırmak için çelik, selüloz, asbest, cam ve polipropilen gibi bir çok tipte lif kullanılmaktadır. Doğal bazalttan üretilen bazalt lifler uzun yıllardır betonun bazı özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılırken zemin iyileştirmesine yönelik çalışmaların sayısının oldukça az olduğu bilinmektedir.

Bu tez çalışmasında bir kil zeminin şişme değerinin bazalt fiber kullanılarak azaltılması amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalar Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarı'nda yürütülmüştür. Çalışmada, öncelikle doğal Düzce kili üzerinde zeminin fiziksel ve indeks özelliklerini belirlemek üzere deneyler yapılmıştır. Sonrasında her biri optimum su muhtevasında hazırlanmış ikisi

doğal (doygun ve doygun olmayan) kil, onsekizi 6 mm, 12 mm ve 24 mm boylarındaki bazalt fiberin doğal zemine %2,0 - %1,5 - %1,0 - %0,50 - %0,25 - %0,20 - %0,15 - %0,10 ve %0,05 oranlarında rastgele karıştırılmasıyla elde edilmiş numuneler olmak üzere toplamda 20 adet numune CBR deneyine tabi tutulmuştur. Numunelerin her biri 3 tabakada statik sıkıştırma ile sıkıştırılmış, 96 saatlik suda ıslatma (bekletme) işlemi sırasında oluşan şişme davranışı incelenmiş ve sonrasında numuneler üzerinde CBR deneyleri yürütülmüştür.



BÖLÜM 2. KATKI MALZEMELERİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRME VE FİBER KATKISI

İnşaat mühendisliği uygulamalarında proje sahasında karşılaşılan zeminler, genellikle mühendislik parametreleri açısından istenen özelliklere sahip değildirler. Sahadaki mevcut zemin tabakaları, düşük mukavemetli, sıkışabilir özellikte veya yüksek hidrolik geçirgenliğe sahip olabilir. Bu gibi durumlarda yapının yerinin değiştirilmesinden kazıklı temeller üzerine yapılmasına kadar değişen geniş bir yelpaze olup seçeneklerden birisi de sahadaki zemin tabakalarının stabilizasyonu ya da bir diğer deyişle “mühendislik özelliklerinin” iyileştirilmesidir. İyileştirme genellikle mekanik veya kimyasal olmakla birlikte bazı durumlarda termal ya da elektriksel iyileştirme yöntemleri de kullanılmaktadır.

Büyük kent ve sanayi bölgelerinde yaşanan arsa sıkıntısı ve yüksek maliyetler, taşıma gücü ve oturma özellikleri açısından sorunlu zeminlerde inşaat yapılmasını ve mevcut yerleşim alanlarının en iyi şekilde değerlendirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Yapıların bu tür zeminlere doğal halleri değiştirilmeden inşa edilmesi durumunda, aşırı oturmalar veya zemin taşıma kapasitesinin zayıf olması nedenleriyle göçmeler meydana gelebilmektedir. Buradan hareketle, son yıllarda artan nüfus ve daralan yapılaşma alanları karşısında inşaat yapılabilecek nitelikte olmayan arazi zeminlerinin iyileştirilerek yapılaşmaya kazandırılması, büyük önem kazanmıştır. Başka bir deyişle bu gibi durumlarda, zeminleri iyileştirme zorunluluğu ortaya çıkmaktadır (Laman ve ark., 2009). Zemin iyileştirmesi denildiğinde zemin taşıma gücünün artırılması, oturma değerlerinin düşürülmesi, sıvılaşma potansiyelinin azaltılması gibi şartları sağlayacak şekilde zemin parametrelerinin değiştirilmesi akla gelmektedir (Şengezer, 2010).

Zeminlerin belirli özelliklerinin, amaçlanan bir mühendislik uygulamasına yönelik olarak, değişik fiziksel, kimyasal veya biyolojik yöntemler kullanılarak iyileştirilmesi olarak tarif edilebilen zemin iyileştirmesi; mukavemet-taşıma gücünün artırılması, şişme-büzülme potansiyelinin azaltılması, deprem ve tekrarlı yükler altında sıvılaşmanın önlenmesi gibi problemlerin çözümlenmesidir (Özaydın, 2012).

Bu tariflere göre zemine doğal veya yapay fiberlerin belli oranda katılarak karıştırılması ve sonrasında sıkıştırılması ile elde edilen iyileştirme mekanik stabilizasyona örnek verilebilir.

2.1. Fiber Türleri

Fiberler, insan eli değmeden doğal kaynaklardan elde edilenler ve yapay olarak insanlar tarafından üretilenler olmak üzere iki başlık altında ele alınabilir. (Aral, 2006). Buna göre doğal lifler; hayvansal, bitkisel ve madensel olmak üzere üçe ayrılmıştır. Yapay lifler, daha çok kullanılacak alana göre özellikleri değiştirilerek ve geliştirilerek üretilmiş malzemelerdir. Doğal ve yapay fiberlere örnekler Tablo 2.1.'de verilmektedir. Tablo 2.2.'de bazı doğal ve yapay fiberlerin özellikleri örnek olarak gösterilmektedir (Kurt, 2006).

Tablo 2.1. Fiber çeşitleri (Aral, 2006).

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

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

Lif Türü	Özgül Ağırlık	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Maksimum Uzama Oranı (%)
Asbest	3,2	83-138	552-966	0,6
Pamuk	1,5	4,8	414-690	3-10
Naylon	1,1	4,1	759-828	16-20
Polyester	1,4	8,3	724-863	11-13
Polietilen	0,95	0,14-0,4	690	10
Polipropilen	0,9	3,5	552-759	25
Karbon	1,9	230-380	380-5520	0,5-1,6
Kevlar	1,44	60-130	3600	0,2-4
Cam	2,5	69	1035-3795	1,5-3,5
Çelik	7,8	200	276-2760	0,5-35
Bazalt Lif	2,8	89	4840	3,15

2.2. Doğal Fiberlere Örnekler

Doğal lifler, eski zamanlardan bu yana insan ihtiyaçları için kullanımları nedeniyle klasik bir malzeme olarak söylenebilirler. Doğal liflere, bitkisel lifler veya bitki lifleri de denir. Lifler, aslında elde edildiği bitkinin kısımlarına göre sınıflandırılır. Bast veya gövde lifleri (jüt, mesta, muz vb.), yaprak lifleri (sisal, ananas vb.) ve meyve lifleri (pamuk, hindistan cevizi, hurma vb.) şeklinde örnek verilebilir.

Doğal elyafların çimento esaslı malzemeler içerisinde dahil edilmesi özellikle 1960'lı yıllardan itibaren ilgi görmüştür. Doğal özellikleri bakımından potansiyeli nedeniyle, birçok araştırmacı inşaat sektöründeki çeşitli uygulamalarda bu tür elyaflardan yararlanmışlardır. Düşük maliyetli ve bulunabilir olmaları, üretimi için daha az enerji tüketimi gerektirmeleri, yenilenebilirlik ve tehlikesiz olma durumları gibi faktörler doğal lifleri tercih edilir kılmıştır. Sisal, malwa, okalipütüs, hindistan cevizi, muz, kenevir, odun lifleri gibi çeşitli doğal lifler, düşük maliyetli konutlarda çeşitli uygulamalar için potansiyel olarak yaygın biçimde kullanılmaktadırlar (Priyadharshini ve Ramakrishna, 2017).

2.3. Yapay Fiberler

Doğal liflerle ilişkili çeşitli hastalıklar ve alkali çözeltiler altında bozulma, aşırı iklim koşulları altında daha uzun servis ömrü ihtiyacı gibi nedenler doğal elyaf kompozitlere olan ilginin azalmasına neden olmuşlardır (Priyadharshini ve Ramakrishna, 2017). Özellikle son zamanlarda doğal liflerin dezavantajlarına karşılık inşaat mühendisliği sektöründe birçok yapay fiber türü kullanılmaya başlanmıştır.

Lif üretimi, kullanılacak ham maddenin sıvı ya da yarı sıvı hale getirilmesi ile başlar ve sonrasında kuru çekme ya da yaş çekme gibi farklı işlemler ile lifler oluşturulur. Aral (2006), yapay lifleri cam, polimer, akrilik, aramid, naylon, polyester (PT), polietilen (PE), polipropilen (PP) ve poliüretan olarak sınıflandırmıştır.

Betonun alkalitesi cam lifleri zamanla çözdüğü için bütün cam lifi tipleri beton uygulamalarında kullanılamaz. Bu alkaliteye karşı zirkon camı gibi dayanıklı camların üretilmesine başlanmış olup bazı cam liflerinin özellikleri Tablo 2.3.'de verilmiştir (Aral, 2006).

Tablo 2.3. Bazı cam liflerin tipik özellikleri (Aral, 2006).

Cam Lif Tipi	Çekme Dayanımı (GPa)	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	Elastisite Modülü (GPa)
E	1,7-3,5	2,54	69-72
S	2,0-4,5	2,48	85
C	1,7-2,8	2,48	70
Cam-lif	-	2,70	80

Polimer lifler ise petrokimya ve tekstil endüstrisinde yapılan araştırmalar ve gelişmeler sonucu üretilmişlerdir. Akrilik, aramid, naylon, polyester, polietilen ve polipropilen başlıca polimer lifleridir. Hepsinin de çok yüksek çekme dayanımları vardır. Fakat bu liflerin çoğu (aramid hariç) düşük elastisite modülüne sahiptirler. Polimer liflerin kalitesi, çap ve uzunluk oranlarına bağlı olup polimer liflerin fiziksel özellikleri Tablo 2.4.'de verilmiştir (Aral, 2006).

Tablo 2.4. Polimer liflerin özellikleri (Aral, 2006).

Lif Tipi	Etkili Çap (10 ⁻³ mm)	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Nihai Uzama (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
Akrilik	13-104	1,17	7,5-50	207-1000	14,6-196
Aramid I	12	1,44	4,4	3620	62
Aramid II	10	1,44	2,5	3620	117
Naylon	-	1,16	20,0	965	5,17
Polyester	-	1,34-1,39	-	896-1100	17,5
Polietilen	25-1020	0,96	3,0	200-300	5,0
Polipropilen	-	0,90-0,91	15,0	310-760	3,5-4,9

2.4. Geotekstil, Lif ve Diğer Katkı Maddeleri ile Zemin İyileştirme Çalışmaları

Akbulut ve Arasan (2004) çalışmalarında Türkiye'nin kuzey-doğusunda Oltu depozitlerinde bulunan doğal kil zemin içerisine 5, 10, 15 ve 20 mm boylarındaki sentetik lifleri (polipropilen (PP) ve polietilen (PE)) ağırlıkça %0,1, 0,2, 0,4, ve 0,6 oranlarında rastgele katarak deney numuneleri hazırlamışlar ve bu numuneler üzerinde hakim frekans deneyleri ve serbest basma deneyleri yapmışlardır. Deneyler sonucunda doğal kil ve lif katkılı numunelerin dinamik parametrelerini ve serbest basınç mukavemetlerini karşılaştırmışlardır. En yüksek mukavemeti, %100'den fazla bir artış ile %0,1 oranında katılan 5 mm'lik Polipropilen (PP) lif katkısının sağladığını gözlemlemişlerdir. Sönümlenme oranı, dinamik kayma ve Young modülü değerlerinde en iyi sonucu ise, % 0,2 oranında Polietilen (PE) lif katkısının verdiğini bulmuşlardır. Buna göre sönümlenme oranı, dinamik kayma ve Young modülü değerlerinde meydana gelen iyileşme sırasıyla %67, %75 ve %64 olmuştur.

Aksoy ve ark. (2006) çalışmalarında, genişmiş polistiren köpük daneleri (PKD), çimento ve Orhaneli uçucu külünün (OUK) belli oranlarda karıştırılmasıyla hazırlanan numuneler üzerinde CBR deneyleri yaparak, karışımın hafif dolgu malzemesi olarak zemin yapılarında kullanılmak üzere üretilmesini incelemişlerdir. Çimento oranı %13 (106 kg/m³) ve uçucu kül oranı %54 (440 kg/m³) olan numunenin 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımları sırasıyla 500 kPa ve 1700 kPa olarak bulunmuş olup ve 28 günlük CBR değeri %60'dır. Çimento-polistiren köpük

daneleri-uçucu kül karışımının, akıcı ve pompalanabilir olması pratikte de kullanılabilirliğini arttırmaktadır. Ayrıca yumuşak zeminlerin oturma ve taşıma gücü problemlerinin çözümünde, karışımın hafifliği ve katılaştıktan sonra kendini tutabiliyor olması, hafif dolgular oluşturulmasında, kayma potansiyeli yüksek şevler üzerinde dolgu teşkil edilmesinde, dayanma yapılarına gelen itkilerin azaltılmasında kullanılabilir bir malzeme haline getirmektedir.

Yılmaz ve ark. (2006) çalışmalarında, kaplamasız yollarda geotekstil kullanımı ile agrega tabakasından elde edilen kazanımları ve geotekstilin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlarda ortaya çıkan maliyeti araştırmışlardır. Kaplamasız yollarda geotekstil kullanımı ile doğal zemin dayanımının (CBR) arttığı, gerekli dolgu kalınlığının azaldığı ve uygun olmayan doğal zemin tabakasının kaldırılması için kazı derinliğinin azaldığı ortaya konmuştur. Geotekstilin, temel malzemesi ile serbestçe drenaj sağlayan agregaların birbirine karışmasını önlediği, yol kaplamalarında ise kaplamanın bütünlüğünü ve uniformluğunu koruyarak yolun farklı oturma miktarlarını minimuma indirmeye yardımcı olduğu gözlemlenmiştir.

Aydoğmuş ve ark. (2006) çalışmalarında, zayıf bir zemin üzerine inşa edilen rüzgar türbininin yüzeysel türdeki temel sisteminin güvenlik ve dönmeye karşı güvenliğini sonlu elemanlar yöntemine dayanan PLAXIS 2D V8.2 yazılımı ile analiz etmişlerdir. Söz konusu yapının temel zemini geosentetik donatılar kullanılarak güçlendirilmiş ve analizlerde donatı elemanı ile dolgu zemininin katkıları ayrı ayrı belirlenmiştir. Yazarlar sonuçta “Sentetik polimerlerden imal edilen örgüsüz geotekstiller, güçlendirme ve tabakalar arası ayırma işlevi görebilmekte ve kullanım ömürleri 20 ile 50 yıl arasında değişebilmektedir. Geçici olarak oluşturulan yolların imalatında, hızlı ve kolay uygulanabilirliği ve servis süresi sonunda kaldırılabilme özelliklerinden dolayı tercih edilirler. Geogrid donatılı olarak imal edilen yüzeysel temel altı tabakası, üzerine gelen üst yapı yükünü alt tabakadaki zemine dağıtarak iletirler ve yüksek çekme gerilmelerini azaltır ve geniş bir rijit plaka gibi davranarak oturmaların uniform olmasını sağlarlar.” tespitinde bulunmuşlardır. Ayrıca geosentetiklerin temel zemininde kullanılmasının, dönmeyi azalttığı gibi zeminin göçmeye karşı güvenliğini de önemli ölçüde arttırdığını göstermişlerdir.

Yılmaz ve Sevcen (2010) çalışmalarında, Çayırhan uçucu külü ve değişik oranlarda polipropilen fiber katkılarıyla yüksek plastisiteli Ankara kilinin mühendislik özelliklerinin nasıl değiştiğini araştırmışlardır. Uçucu kül-kil karışımlarında uçucu kül miktarının artırılması ile optimum su muhtevasında azalma eğilimi görülmekte olup uçucu kül miktarının artmasıyla karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlığı da artma eğilimindedir. Fibersiz uçucu kül-kil karışımlarında, 1 ve 7 günlük kür sürelerinde uçucu külün %10'dan daha fazla olmasının karışımın tek eksenli basınç dayanımı üzerine etkisi yok denecek kadar az olmakla birlikte 14 ve 28 günlük kür sürelerinde karışımdaki uçucu kül oranının artırılması tek eksenli basınç dayanımını arttırmaktadır. 28 günlük kür süresinden sonra elde edilen tek eksenli basınç dayanımlarına bakıldığında %1,0 fiber katkısının fiber-uçucu kül-kil karışımlarının dayanımlarına etkisinin %0,5 fiber katkısına oranla daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Dayanımlardaki düşme ve yükselişler, fiber katkısının zemine rastgele katılması ve yenilme düzlemlerinde topaklaşma ve toplaşmaları ya da toplaşmamalarıyla izah edilmiştir. Bu çalışmada yüksek plastisiteli kile, fiberin tek başına katılmasıyla hazırlanan numunelerde tek eksenli basınç dayanımında az da olsa düşme görülebildiği belirtilmiştir.

Zaimoğlu (2011) çalışmasında, borjips, uçucu kül, katkısız çimento ve polipropilen fiberi birlikte kullanarak ince daneli zeminlerde serbest basınç dayanımını incelemiştir. Numune toplam ağırlığının %10-20'si oranlarında uçucu kül (FA), %10-20'si oranında borjips (BG), %0,15-0,25'i oranlarında polipropilen fiber (PF) ve %1-3'ü oranlarında katkısız çimento (KC) silt zemin içerisine ilave edilerek kendi optimum su içeriği ve maksimum kuru birim ağırlıklarında numuneler hazırlanmıştır. 7 günlük serbest basınç dayanımları; hiç bir katkı maddesi katılmadan hazırlanan %100 silt kontrol numunesinde 0,57 MPa, %20 borjips, %10 uçucu kül, %0 polipropilen fiber ve %3 katkısız çimento katılan numunede 0,35 MPa, %10 borjips, %10 uçucu kül, %0,25 polipropilen fiber ve %0 katkısız çimento olan numunede 0,94 MPa olarak elde edilmiştir. Buna göre 7 günlük serbest basınç dayanımı üzerinde en etkili parametrenin polipropilen fiber olduğu, uçucu külün bir etkisinin bulunmadığı tespit edilmiştir. %0 BG (BG1), %20 FA (FA2), %1,5 PP (PP2) ve %3 C (C3) oranlarında hazırlanan numunelerde 28 günlük serbest basınç

dayanımının optimum şartı sağladığı ve bu durumdaki değerinin 1,95 MPa olduğu gözlemlenmiştir. 28 günlük serbest basınç dayanımı üzerinde en etkili parametrenin uçucu kül oranı olduğu tespit edilmiştir. Ancak polipropilen fiberin %0,15 ve uçucu külün %10 oranlarından daha fazla kullanılması durumlarında serbest basınç dayanımlarının düştüğü görülmüştür.

Ayraçma ve Teymür (2014) çalışmalarında, %20, %40 ve %60 rölatif sıklıklardaki uniform temiz kuru kuma, cam fiberin farklı oranlarda katılmasıyla oluşan zemin iyileşmesini incelemişlerdir. %20 ve %40 rölatif sıklıklardaki kuma yapılan cam fiber katkı, içsel sürtünme açısını yükselterek kayma mukavemetini arttırmış olup %60 sıklıktaki kum fiber karışımında aynı sonuç alınamamıştır. Tüm karışımlarda kayma düzlemiyle kesişen fiber liflerinin pik kayma gerilmesini arttırdığı anlaşılmıştır. Sıkı kumlarda fiber katkısının içsel sürtünme açısına belirleyici bir etkisi olmamakla birlikte gevşek-orta sıkı kumlarda fiber oranının %0,25'ten %0,50'ye artırılmasıyla bu değer büyüdüyü görülmüştür. Ancak fiber katkı oranının artmasıyla fiber dağılımına bağlı olarak yeni akım yolları ve boşluklar oluştuğundan suyun geçişinin kolaylaştığını ve zeminin geçirimliliğinin arttığını gözlemlenmişlerdir.

Işık ve ark. (2015) çalışmalarında yüksek plastisiteli (CH) kil zemin içerisine doğal atık tavuk tüyünden elde edilen telek ve tüy lifi rastgele %1 ve %2 oranlarında ayrı ayrı katarak kil zeminin, donma-çözülme davranışının iyileştirilmesinde bu malzemelerin donatı olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Yüksek plastisiteli (CH) kil zemin içerisine, 4 mm'lik ve 8 mm'lik telek ile donatılma yapılarak hazırlanmış numuneler 5 ve 10 donma-çözülme çevrimine maruz bırakıldıktan sonra serbest basınç deneyine tabi tutulmuş ve mukavemetlerinde (q_u) olumlu bir değişimin olmadığı, lakin tüy lifi ile donatılarak hazırlanmış numunelerde ise artış görüldüğü gözlemlenmiştir. Donma-çözülmeye maruz bırakılmamış donatısız numunenin q_u değeri 199 kPa iken tüy lifi (%2) donatılı numunenin q_u değeri 277 kPa'a ulaşmıştır. 5 çevrim için bu değerler 52 kPa'dan 104 kPa'a ve 51 kPa'dan 130 kPa'a yükselmiştir. Genel olarak beklenildiği gibi donma-çözülme çevrim sayısı arttıkça pik gerilmede azalma meydana geldiği ve yine donma-çözülme çevrimlerine maruz

kalan donatılı ve donatısız numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde azalmalar olduğu gözlemlenmiştir. Telek (4 mm) ile donatılandırılmış numunelerde donatı oranının artması pik gerilmenin düşmesine neden olmuş, tüy lifi donatılı numunelerde ise tüm donma-çözülme çevrimlerinde donatı oranı arttıkça serbest basınç mukavemetinde artış tespit edilmiştir.

Özdemir ve ark. (2016) çalışmalarında kaolin kilinin dayanımına, bazalt fiber ile kireç ilavesinin etkilerini incelemiştir. Kaolin kilinin likit limiti (w_L) %56, plastik limiti (w_P) %30, plastisite indisi (I_p) %26 ve özgül ağırlığı 2,62 olarak tespit edilmiş olup sekant modülü-serbest basınç dayanımı ilişkileri tablosunda kireç katkısız numunelerde $E_{50}=8,13q_u$ (kPa) ve $R^2=0,85$, kireç katkılı numunelerde ise $E_{50}=103,01q_u$ (kPa) ve $R^2=0,84$ olarak verilmiştir.

Kaolin kiline %0 ve %9 oranlarında kireç katılarak hazırlanan deney sonuçları kıyaslandığında kaolin kiline kireç ilavesinin dayanımı arttırdığı gözlemlenmiştir. %9 oranında kireç katılarak hazırlanan örneklerin tamamında fiber takviyeli numunelerde en yüksek dayanım 28 günlük kür süresinde ölçülmüştür. Kür süresi arttıkça dayanımlarda artış gözlenmektedir.

%0 kireç içeriğinde hazırlanan örneklerde dayanım, bazalt fiber %0,50 içeriğinde kullanıldığında kür süresinden bağımsız olarak 1,5 katına kadar artış göstermiştir. Fiber içeriği %1,00'e çıkarıldığında dayanımlarda 2 kata kadar artış görülmüştür. Deneyler sonucunda tek başına bazalt fiberin, kaolin kil zeminin dayanımına çok ciddi oranda katkı sağlamadığı, %0,50 oranında bazalt fiber ilaveli örneklerde 1, 7 ve 28 günlük dayanımların ortalama 150 kPa, maksimum dayanımın sağlandığı %1,00 bazalt fiber katkılı zeminin 28 günlük örnekte 186 kPa olduğu gözlemlenmiştir. Fiber ilaveli kireç kombinasyonlarında en yüksek dayanıma, %1,0 fiber içeriği olan durumda 28 günlük kür sonunda ulaşıldığı ve kontrol numunesinin 5,5 katı dayanım sağlandığı tespit edilmiştir.

Karakan ve ark. (2016) çalışmalarında mono-filament fiber kullanılarak oluşturulan fiber katkılı kum zeminlerin sıvılaşma davranışını rölatif sıkılık, fiber oranı ve fiber

boyu parametrelerini kullanarak araştırmışlardır. İki farklı rölâtif sıklık ($D_r=30$, $D_r=70$), dört farklı fiber oranı (fibersiz, $FO=0,25$, $0,50$ ve $1,00$) ve iki farklı fiber boyu (6 mm ve 12 mm) için sıvılaşmanın tespitine yönelik deneyler yapmışlardır. Hazırlanan kum numunelerde fiber katkısının ve boyunun arttırılmasıyla sıvılaşmaya karşı dayanımın arttığını gözlemlemişlerdir. Fiber katkılı zeminlerde fiberin sıvılaşmaya karşı yanall yayılmayı engellediğini görmüşlerdir. Ayrıca rölâtif sıklığın etkisini incelediklerinde fiber katkılı gevşek zeminlerin, orta sıkı fiber katkılı zeminlere göre daha kolay sıvılaşma eğilimi gösterdiği sonucunu çıkarmışlardır.

Eskişar ve Altun (2015) çalışmalarında kaolin ve bentonit katkılı kaolin kil zeminlerin, polipropilen fiber katılarak donatılı hale getirilmesi sonrasında serbest basınç mukavemetlerini ve farklı donma çözölme devirleri etkisi altındaki mukavemet değişimlerini araştırmışlardır. Bentonit katkılı zeminlerde mukavemetin, bentonit oranı arttıka azalmakta olduğu, hidrofobik özellikteki fiber donatı eklenmesinin ise mukavemeti arttırdığı bulunmuştur. Zemine katılan 12 mm uzunluğunda $0,75$ oranındaki PP fiber katkının en iyi mukavemet değerini verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca donma çözölmeye maruz kalmış zeminlerde, fiber boyundan ziyade fiber oranının arttırılmasının, donma çözölme etkilerini azaltmış olduğu ya da serbest basınç mukavemetini arttırdığı ve PP fiberin sünek davranışlarını devam ettirdikleri gözlemlenmiştir.

Saygılı ve ark. (2016) çalışmalarında 5 kireçle zenginleştirilmiş kil numunelerin serbest basınç dayanımını maksimize edecek silis dumanı ve sentetik lif katkısı oranını araştırmışlardır. Kireçle zenginleştirilmiş kil numune içerisine 12 mm uzunluğunda tek flamanlı polipropilen lifler ağırlıkça 0 , $0,25$, $0,5$ ve $1,0$ oranlarında ve silis dumanı ise 0 , $2,5$, $5,0$ ve $10,0$ oranlarında katılmış ve sonrasında kil numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. 28 günlük kür sonunda yapılan deneylerde 5 silis dumanı ve $0,25$ polipropilen lif katkısının yaklaşık 6 kat, 90 günlük kür sonunda yapılan deneylerde ise 1 lif ve $2,5$ silis dumanı katkısının yaklaşık 10 kat ile en yüksek dayanım değerlerini verdiği tespit edilmiştir.

BÖLÜM 3. BAZALT VE BAZALT FİBERLER

3.1. Bazalt

Bazalt, volkanik bir kaya olup sıcaklık aralığı, mukavemet ve dayanıklılık açısından yüksek performans gösteren doğal bir maddedir. Küçük parçacıklara ayırma ve eritme süreci sonrasında elyaf formunda da üretilebilmektedir. Bazalt fiberlerin, üretimi esnasında hiçbir katkı maddesi kullanılmaması maliyet açısından cam, çelik ve karbon liflerine karşı büyük bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca bazalt fiberlerin, cam elyaftan daha yüksek çekme dayanımı gösterdiği, karbon liflere göre zehirli gazlara, kimyasal etkenlere, darbe yüklerine ve ısıya karşı daha yüksek direnç gösterdiği bilinmektedir (Kabay, 2014).

Bazaltın rengi, demirin içeriğine bağlı olarak kahverengiden donuk yeşile döner. Bazalt lifler, 1300 °C - 1700 °C'de kayanın eritilip döndürülerek çekilmesiyle elde edilir. Bazalt, iyi mekanik özelliklerinin yanı sıra yüksek kemo ve termal stabiliteye sahip olup, ısı, ses ve elektrik yalıtımı özellikleri de yüksektir. Bazaltın, termal yalıtım yeteneği, asbestin üç katına eşit olduğundan yangından korumada kullanılır (Parnas ve ark., 2007).

Bazalt, fiziksel, kimyasal, mekanik ve görsel özellikleri sayesinde mimari ve mühendislik alanlarını kapsayan bir çok projede vazgeçilmez olan volkanik kaya türlerinden birisidir. Sokak ve caddelerde peyzaj malzemesi olarak, alt yapılarda zemin kaplaması ve üst yapılarda cephe kaplaması olarak sıkça kullanılmaktadır. Günümüzde demir yollarında kalkerin yerine balast malzemesi olarak, kırma taş haline getirilerek beton içinde agrega olarak, ayrıca her türlü ısı ve ses yalıtımı malzemesi olarak kullanılan taş yünü yapımında kullanılmaktadır. Yapısında zararlı ve zehirli serbest silis içermeyişi nedeniyle, silis ve kuvars kumu kullanılan birçok iş

sektöründe alternatif ve doğal bir hammadde olarak kullanılmaktadır (Swink, 2002). Ayrıca bazalt, endüstri hammadesi olarak, polimer ve düşük yoğunluklu polietilen örneğinde olduğu gibi kompozit malzeme üretiminde kullanılabilir (Akıncı, 2009; Çalışkan ve ark., 2011).

Bazalt yer kabuğunun %33'ünü oluşturan bol miktarda bulunabilen ve çıkarılması kolay bir kaya türüdür. Kimyasal içeriği ve fiziksel özellikleri bulunduğu coğrafyaya bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Yapısında kimyasal olarak olivin, plajiyoklas, klinopiroksen ve piroksen minerallerini içerir. Bazalt alümina izi ile birlikte, sodyum, potasyum, kalsiyum, silikon, magnezyum ve demir oksitleri ile kimyasal olarak zengin bir doğal taştır. Bazalt sodyum açısından zengin ve silis açısından fakir ise toleyitik bazalt, bileşimde silis eksik ise alkali bazalt olarak sınıflandırılmaktadır (Ndepete ve Sert, 2017).

Ülkemizde de bazalt kayalar geniş bir bölgede bulunabilmektedir. Van, Şanlıurfa, Gaziantep, Afyonkarahisar, Kars, Ardahan, Elazığ, Eskişehir, Erciyes, Konya, Doğu Anadolu ve Manisa'da rastlanabilmektedir. Tablo 3.1. Türkiye'de bulunan bazaltların kimyasal içeriklerini göstermektedir (Yılmaz, 2015).

Tablo 3.1. Türkiye bazaltlarının kimyasal bileşenleri (% ağırlıkça) (Yılmaz, 2015).

Oksit	Erciyes Dağı (Akdere)	Konya Yöresi (Acıgöl)	Manisa Yöresi (Kula)	Doğu Anadolu (Nemrut Kayaları)
SiO ₂	47,5	50,13	47,5-48,24	46,55
Al ₂ O ₃	18,04	17,60	18,52-20,95	13,23
Fe ₂ O ₃	3,13	2,49	3,29-4,75	1,9
FeO	6,41	5,00	5,2-6,32	7,14
CaO	10,35	11,26	7,56-8,37	18,9
MgO	7,18	7,09	4,36-5,54	7,88
Na ₂ O	3,5	4,04	5,08-7,66	2,96
K ₂ O	0,49	0,91	0,69-2,31	1,26
P ₂ O ₅	0,22	0,18	0,13-0,97	0,22
H ₂ O	-	0,16	0,02-0,46	0,36
TiO ₂	1,36	-	-	2,29
MnO	0,14	-	-	0,18

3.2. Bazalt Fiber

1923 yılında ABD'de yaşayan bir Fransız bilim insanı, bazalt elyaf üretim tekniğini ilk kez açıklayarak patent almıştır. Daha sonrasında bazalt lif üretim teknolojisi ile ilgili çalışmalar savunma sanayi alanında ihtiyaçların giderilmesi amacıyla SSCB'de geliştirilmiştir (Parnas ve ark., 2007).

Bazalttan sürekli bir şekilde lif ve elyaf üretebilme, bazaltın üretim aşamasında kademeli kristalleşme ve düzensiz erime gibi olumsuzlukların 1980'lerin sonlarına doğru çözüme ulaştırılmasıyla mümkün olabilmektedir. İlk bazalt elyafı tesisleri SSCB'ye bağlı olarak Ukrayna ve Gürcistan'da kurulmuştur (Parnas ve ark., 2007).

3.2.1. Bazalt fiberlerin üretimi

Bazalt, yer kabuğunda bol miktarda bulunması ve kolay ulaşılabilmesi nedeniyle pahalı bir ham madde değildir. Fakat bazalt lifinin performans özelliklerinin iyileştirilebilmesi için üretimde kullanılacak bazalt kaynağının niteliği önem kazanmaktadır. Bazaltın niteliğini etkileyen parametreler olan yanardağ lavlarının oluşumu, kimyevi bileşimi, katılaşma sürecinde hava ile etkileşimi ve bazaltın soğuma hızı iyi bir bazalt elyafı üretebilmek için oldukça önem arz etmektedir (Parnas ve ark., 2007).

Bazalt ve cam fiberlerin üretim metotları birbirine benzemektedir. Cam fiber ve bazalt fiberlerin üretiminde kullanılan araç-gereç birbirine benzerken sıcaklık ve viskozite parametreleri değişiklik göstermektedir. Bazalt fiber üretiminde ilave olarak dışarıdan herhangi bir katkı malzemesine ihtiyaç duyulmamaktadır. Büyük kütleler halinde olan bazalt kayalar önce kırılıp daha küçük parçalar haline getirilir. Bunlar yıkandıktan sonra doğrudan fırınlanır ve eritilirler. Ergimiş doğal bazalt hızla soğuyarak, kısmi kristalin yapıdan tamamen amorf yapıya dönüşür. Amorf katı son derece yüksek viskoziteli süper-soğumuş sıvı gibi davranır. Daha sonra erimiş bazalt, üzerinde çokça mikro delik bulunan platin alaşımli çekme ağızlarından akışı sağlanarak lif olmak üzere çekilme işlemi yapılır. Üretilen liflerin çaplarının

kontrolü, üzerinde mikro delikler bulunan çekme ağzındaki delik çapları ve bazaltın viskozitesi ile sağlanır. Çekilen filamentler su ile soğutulur ve katılaşmaları sağlanır. Çekilen liflerin çapları 7 ile 20 μ arasında değişir (Swink, 2002).

3.3. Bazalt Fiberlerin Özellikleri

Bazalt fiberler yüksek mekanik özellikleri ile kompozit malzemeler için ilave malzemesi olarak, ideal kusursuz kimyasal direnç göstermeleri sebebiyle korozyona maruz kalan ortam uygulamalarında, ateşle tutuşmaması ve yüksek ısılarda özelliklerini kaybetmemesinden dolayı yangın güvenliği ve teknolojilerinde, ısı ve ses yalıtımı özelliği ile de izolasyon malzemesi olarak kullanılmaktadır. Yüksek özellikleri ile bazalt fiberler birçok sektörde hammadde olarak kullanılmaktadır (Gümülçine ve ark., 2013).

3.3.1. Mekanik özellikleri ve dayanıklılığı

Bazalt fiberin çekme mukavemeti 3000 ile 4840 MPa arasında olup 3100 MPa ve 4650 MPa'lık çekme mukavemetine sahip olan E-cam ve S-cam fiberlerden daha yüksektir. Özgül ağırlığı 2,65-2,80 aralığında olup diğer fiberlere göre biraz daha yüksektir.

3.3.2. Kimyasal direnç

Bazalt fiberler, pH değerlerinin 13-14'e ulaşabilmesi sayesinde kimyasal maddelere, özellikle güçlü alkalilere karşı çok iyi bir dirence sahiptir. Ayrıca iyi bir asit ve tuz direncine sahiptir.

3.3.3. Korozyon ve mantar direnci

Bazalt fiberler, nem içeriklerinin %1'den daha az olması ve geçirimsizlikleri sayesinde yüksek korozyon direncine sahiptirler. Bazalt fiberler su, hava ya da gaz ile herhangi bir zehirli reaksiyona uğramaz. Ayrıca bazalt malzemeler mantar ve mikro organizmalara karşı da oldukça dirençlidirler (Ndepete ve Sert, 2017).

3.3.4. Ekolojik yapı

Bazaltın doğal bir taş olması ve fiber üretiminde dışarıdan herhangi bir katlı maddesi kullanılmamasından dolayı bazalt fiberleri içerisinde insan sağlığına zararlı hiçbir madde bulunmaz ve bu bazalt fiberin çevreci dostu olarak anılmasını sağlamaktadır. Ayrıca ısı ve ses yalıtım malzemesi olarak incelendiğinde; bazaltın yanmazlığı ve yalıtım performansı bakımından üstün olması onu insan sağlığına zararlı olan asbeste göre tercih edilir kılmaktadır (Parnas ve ark., 2007). Cam elyaf imalatı sırasında kullanılan borik asit gibi katkıların bazalt fiber imalatında kullanılmamasının teknik olarak imalatı zorlaştırdığı, ancak elde edilen mekanik özelliklerin çok daha iyi olduğu belirtilmektedir. Tablo 3.2.'de bazalt fiberlerle diğer fiberlerin karşılaştırması gösterilmektedir.

Tablo 3.2. Bazalt elyafı ile diğer elyaf türlerinin karşılaştırması (Kumbhar, 2014).

Uygunluk	Bazalt Fiber	E- Camı Fiber	S-Camı Fiber	Polyamid Fiber	Karbon Fiber
Gerilme Direnci, (MPa)	3.000-4.840	3.100-3.800	4.020-4.650	2.900-3.450	3.500-6.000
Elastite Modülü, (GPa)	79,3-93,1	72,5-75,5	83-86	70-140	230-600
Kopmada Uzama, (%)	3,1-6,0	4,7	5,3	2,80-3,60	1,50-2,00
Birim Hacim Ağırlık	2,65-2,80	2,50-2,62	2,46	1,44	1,75-1,95
Lif çapı, (µm)	6-21	6-21	6-21	-	5-15
Uygulama Sıcaklığı,(°C)	-260-500	-50-380	-50 - 300	-50 - +290	-50 - +700
Erime Sıcaklığı,(°C)	1.450	1.120	1.550	-	-

3.4. Bazalt Lif Ürünleri

Bazalt ürünleri, bir çok sanayi sektöründe kıyılmış bazalt lifler, bazalt ip ve çeşitli uzunluk ve çaplarda bazalt çubuklar olarak çok farklı şekillerde kullanılmaktadır.

Kıyılmış bazalt lifler, farklı boy ve çaplarda ülkemizde ve bir çok ülkede geniş kullanım alanı bulunmaktadır. Günümüzde 5 ile 100 mm arasında bir uzunluğa ve 7 - 20 mikron arasında bir çapa sahip bazalt fiberler beton teknolojilerinde, yorulma/aşınma direncini arttırmak için ilave bir katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Kıyılmış bazalt fiberler (Bazalt, 2019).

Bazalt ip, sentetik lif ve elyaf kumaşa alternatif olarak, kimya endüstrisi, petrokimya sanayisinden havacılık, otomotiv ve inşaat sektörüne kadar kullanılmaktadır (Şekil 3.2.).



Şekil 3.2. Bazalt ip (Bazalt, 2019).

Bazaltın yüksek korozyona sahip olmasından dolayı bazalt donatı çubukları epoksi ile bağlanmış %80 oranında bazalt fiber ihtiva ederler. Beton performansını, betonla aynı mertebede genleşme katsayısına ($8 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$) sahip olduklarından artırır. Bazalt donatı çubukları Şekil 3.3.'te gösterilmektedir (Ndepete ve Sert, 2017).



Şekil 3.3. Bazalt donatı çubukları (Bazalt donatı, 2019).

3.5. Bazalt Fiberin Betonda Kullanımı

Doğal bazalttan üretilen fiberlerin betonun özelliklerini iyileştirmede sıklıkla kullanıldığı bilinmektedir.

Tang ve ark. (2012) çalışmalarında bazalt elyaf takviyesinin, yüksek performanslı çimentonun eğilme mukavemeti üzerine etkisini incelemişlerdir. Bazalt elyaf dağılımı, su - çimento oranı ve kum - kireç oranı gibi üç faktörün deneysel tasarımı ve istatistiksel analizlerin sonucunu etkilediği bilinmektedir. Buna göre hazırlanan numuneler üzerinde basınç ve eğilme deneyleri 7 ve 28 günlük kür sürelerinin sonunda yürütülmüştür. Proje ihtiyaçlarına göre, eğilme mukavemetinin en iyi kombinasyonu optimize edilmiştir. Güçlendirme mekanizması ve hasar özellikleri SEM tarafından analiz edilip değerlendirildiğinde bazalt liflerin sonuç üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Geliştirilmiş bileşimin eğilme mukavemetini artırma etkisine sahip olduğu ve maksimum artırılmış oranın 2,91 değerine ulaştığı tespit edilmiştir. Çalışmada, bazalt lifin diğer fiberlere oranla daha iyi fiziksel ve mekanik özelliklere ve alkali direncine sahip olduğu vurgulanmıştır. Bazı performans değerlerinin sadece karbon lifinden sonra geldiği ancak bazalt lif maliyetinin karbon

fiberden çok daha düşük olması nedeniyle bazalt lifin betona katkı anlamında geniş bir uygulama potansiyeline sahip olduğu da belirtilmiştir.

Satheskumar ve ark. (2018) bazalt lifin çevre dostu ve aynı zamanda iyi mekanik özelliklere sahip olması nedeniyler beton üretiminde ilgi çeken malzemelerden biri olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada, yüksek mukavemetli kıyılmış bazalt elyafı güçlendirilmiş betonun işlenebilirliği, mukavemet özellikleri, darbe dayanımı ve hidrasyon özellikleri incelenmiştir. Beton numuneler dökülürken diğer doğal malzemeler sabit tutulmuş, doğal ince agreganın ikame maddesi olarak kum kullanılmıştır. Bu karışıma farklı oranlarda bazalt lifi katılmıştır. 28 günlük kür süresinden sonra, en yüksek basınç ve ayrılmaya karşı mukavemetin, nehir kumu ve ağırlıkça %1 bazalt lifi içeren numune ile elde edildiği görülmüştür. 18 mm uzunluğunda bazalt lifi içeren örneklerin, 12 mm elyaf içeren örneklerden daha güçlü olduğu gözlemlenmiş olup bu, bazalt lifinin uzunluğunun artırılmasının, betonun mukavemet özelliklerini, ayrıca darbe dayanımını da artırabileceğini göstermiştir.

Günaydın ve Güçlüer (2018) çalışmalarında beton malzemeye bazalt lifi katkısının etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla beton numunelere çimento hacminin %1'i oranında bazalt lifi ilave edilerek deney örnekleri üretilmiş, 7 ve 28 günlük deney örnekleri üzerinde basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Sonuç olarak, 7 günlük basınç dayanımı değerlerinde, bazalt lifi katkısının %4,45 oranında artışa ve yarmada çekme dayanımları değerlendirildiğinde ise bazalt lifi katkısının %5,03 oranında artış sağladığı gözlemlenmiştir. Aynı deneyler için 28 günlük sonuçlar incelendiğinde ise artış değerlerinin %2,16 ve %16,46 olduğu tespit edilmiştir.

Arslan (2017) çalışmasında bazalt liflerinin geleneksel betonun mekanik özelliklerine ve eğilme altında kırılma parametrelerine etkilerini incelemiştir. Betonun kırılma enerjilerinin belirlenmesi amacıyla, RILEM TC 50-FMC standardına uygun olarak, lifsiz ve 24 mm boyunda 0,5, 1, 2 ve 3 kg/m³ bazalt lif içeriğine sahip 15 adet 50x100x480 mm boyutlarında çentikli kiriş numuneleri üretilmiştir. Üretilen çentikli kiriş numuneleri üzerinde üç nokta eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Çentikli kiriş

numunelerin kırılma enerjileri, yük-çatlak açıklığı eğrisinin altında kalan alan kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, bazalt liflerin betonun kırılma enerjisini önemli oranda artırdığını göstermiştir. Bunun yanında bazalt liflerin, betonun basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Yarmada ve eğilmede çekme dayanımlarında ise 2 kg/m³ lif içeriğinden sonra azalma başladığı görülmüştür. Elde edilen sonuçların tamamı beraber değerlendirildiğinde geleneksel beton için en uygun lif oranının 2 kg/m³ olduğu belirlenmiştir.

Chaohua ve ark. (2014), yüksek süneklik ve yeterli dayanıklılık gösterdiği için yaygın olarak kullanılan elyaf takviyeli beton (FRC) üzerinde çalışmışlardır. Bu araştırmada, bazalt lifi (BF) uzunluğu ve hacimsel olarak katkı oranının FRC'nin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve civa intrüzyon porozimetresi (MIP) sonuçları birlikte değerlendirilerek BF betonunun mikro yapısı da incelenmiştir. Sonuçlar, BF eklemenin çekme dayanımını, eğilme dayanımını ve tokluk endeksini önemli ölçüde geliştirdiğini gösterirken, basınç dayanımında belirgin bir artış görülmemiştir. Ayrıca, BF'in uzunluğunun mekanik özellikler üzerinde etki oluşturduğu da ortaya konmuştur.

3.6. Bazalt Fiber Katkısı ile Zemin İyileştirme Örnekleri

Ndepete ve Sert (2017) çalışmalarında Adapazarı'ndan elde edilen silt zemin üzerinde konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyleri (UU) yapmışlar, sonrasında aynı deneyleri siltli zemine 6 - 12 - 24 mm boylarındaki bazalt fiberin, %1 - %1,5 ve %2 oranında karıştırılması ve sıkıştırılması sonrasında elde edilen silindirik numuneler üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada 24 mm uzunluğundaki bazalt fiberin silt zemine %1,5 oranında karıştırıldığı doymun olmayan numunelerde şahit numuneye oranla %160,12'ye varan bir iyileşme gerçekleştiği bulunmuştur. Doymun numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerde ise en yüksek artış değeri gene 24 mm uzunluğundaki bazalt fiberin zemine %1,5 oranında eklendiği numunelerde %88,63 olarak elde edilmiştir.

Kenan ve Özocak (2018) çalışmalarında doymun silt zeminin kayma direncine bazalt fiber katkısının etkisini kesme kutusu deneyiyle araştırmışlardır. Adapazarı kent merkezinden alınan doğal silt numunesine 24 mm boyunda bazalt fiber farklı oranlarda ilave edilerek hazırlanan numunelerin kayma direnci parametreleri ölçölmüşlerdir. Deney sonuçları, bazalt fiber oranının artması ile numunelerin kohezyon değerinde sürekli bir artışın olduğunu göstermiştir. Fakat bazalt fiber oranının artması ile kayma direnci açısı değerinin önce artan sonra azalan bir eğilime girdiği gözlemlenmiştir. Böylece bazalt fiber katkısının zeminin kayma direnci parametrelerinde bir iyileştirme işlevi gördüğü tespit edilmiştir. Tüm numuneler değerlendirildiğinde kesme kutusu deney verilerine göre siltli numunede bazalt fiber katkısının optimum değerinin %1,50 olarak alınmasının uygun olduğu görölmüştür. Çalışma sonunda çevre dostu olan bazalt fiberin zemin özelliklerini iyileştirmede alternatif ve avantaj sağlayan bir malzeme olarak kullanılabilceği belirtilmiştir.

BÖLÜM 4. MALZEMELER VE METOT

Bu bölümde çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri, zemine ilave edilen katkı maddesinin karışım oranları ve deneyde kullanılan numunelerin hazırlanışı hakkında bilgiler verilmiştir. Deney yöntemleri tanıtılmış ve numuneler üzerinde yapılan deneylerin sonuçları tablolar ve grafikler halinde sunulmuştur.

4.1. Malzemeler

4.1.1. Kil zemin

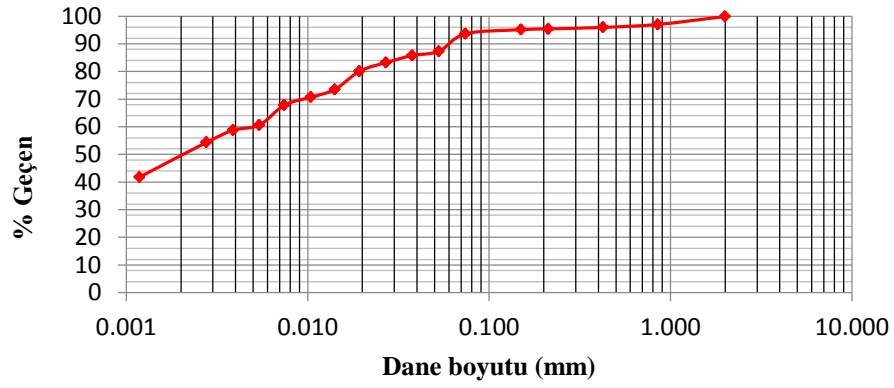
Yapılan deneylerde kullanılan Düzce kili Şekil 4.1.'de, fiziksel özellikleri Tablo 1'de, dane dağılım eğrisi Şekil 4.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan kil zemin

Tablo 4.1. Kil zeminin fiziksel özellikleri

Özellikleri	Değerleri
Sınıf (TS1500)	CI
-No:200 (%)	93,62
Likit Limit (LL)	47,00
Plastik Limit (PL)	17,80
Plastisite İndisi (PI)	29,20
Silt (%)	44,12
Kil (%)	49,50



Şekil 4.2. Kil zeminin dane dağılım eğrisi

4.1.2. Bazalt fiber

Çalışmada kullanılan bazalt fiber Spinteks Tekstil İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş (Denizli / Türkiye) tarafından sağlanmıştır. 6 mm - 12 mm ve 24 mm uzunluğundaki bazalt fiberler torbalar halinde satışa sunulmaktadır. Şekil 4.3.'te farklı boydaki bazalt fiberlerin görünüşleri sunulmaktadır.



Şekil 4.3. Denede kullanılan bazalt fiber örnekleri

Tablo 4.2. çalışmada kullanılan bazalt fiberlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini göstermektedir (Ndepete ve Sert, 2017).

Tablo 4.2. Bazalt fiberin fiziksel ve mekanik özellikleri (Ndepete ve Sert, 2017).

Bazalt Fiber		
Özellikler	Değer	Birim
Birim hacim ağırlık	2,60 - 2,65	g/cm ³
Elastisite modülü	70 - 90	GPa
Çekme dayanımı	2800 - 3000	MPa
Kopma uzaması	3,1 - 6	%
Çapı	45809	µm
Uygulamanın sıcaklığı	(-250) - (+550)	°C
Erime noktası	1350	°C
Fiyat	6	USD/Kg

4.2. Yöntem

Bu çalışmada TS 1900-1 standartına uygun olarak zemin sınıfını belirlemek üzere laboratuvarında likit limit, plastik limit ve elek analizi deneyleri yapılmıştır. Ayrıca kil sınıfına sahip zemindeki kil ve silt yüzdesinin belirlenmesi için hidrometre analizi, özgül ağırlığın belirlenmesi için de piknometre deneyleri yapılmıştır.

Öncelikle doğal kilin optimum su muhtevasında karıştırılmasıyla hazırlanmış numuneler üzerinde CBR deneyleri yapılmıştır. Sonrasında ise Şekil 4.3.'te gösterilen 6 mm, 12 mm ve 24 mm boylarındaki bazalt fiberin, optimum su muhtevasındaki doğal zemine %2.0 - %1.5 - %1.0 - %0,50 %0,25 - 0.20 - %0.15 - %0.10 ve %0.05 oranlarında rastgele karıştırılmasıyla elde edilen numuneler üzerinde CBR deneyi tekrarlanarak şişme davranışı incelenmiştir. Tablo 4.3.'de hazırlanan numunelerde kil ve bazalt fiber ağırlıkları ve bazalt fiberlerin boy ve oranları gösterilmiştir.

Tablo 4.3. Hazırlanan numunelerde kil ve fiber ağırlığı, fiber boy ve oranları

Karışım No	Numune Tanımı	Zemin Ağırlığı (gr)	Fiber Ağırlığı (gr)	Fiber Uzunluğu (mm)	Fiber Oranı (%)
0	Doğal zemin		-	-	-
1	Doğal doymun zemin		-	-	-
2a	% 0,05 Fiber Katkılı	3500	1,75	6	0,05
2b	% 0,10 Fiber Katkılı		3,50		0,10
2c	% 0,15 Fiber Katkılı		5,25		0,15
2d	% 0,20 Fiber Katkılı		7,00		0,20
2e	% 2,00 Fiber Katkılı		70,00		2,00
3a	% 0,05 Fiber Katkılı		1,75	12	0,05
3b	% 0,10 Fiber Katkılı		3,50		0,10
3c	% 0,15 Fiber Katkılı		5,25		0,15
3d	% 0,20 Fiber Katkılı		7,00		0,20
4a	% 0,05 Fiber Katkılı		1,75	24	0,05
4b	% 0,10 Fiber Katkılı	3,50	0,10		
4c	% 0,15 Fiber Katkılı	5,25	0,15		
4d	% 0,20 Fiber Katkılı	7,00	0,20		
4e	% 0,25 Fiber Katkılı	8,75	0,25		
4f	% 0,50 Fiber Katkılı	17,50	0,50		
4g	% 1,00 Fiber Katkılı	35,00	1,00		
4h	% 1,50 Fiber Katkılı	52,50	1,50		
4ı	% 2,00 Fiber Katkılı	70,00	2,00		

4.2.1. Fiziksel deneyler

Sınıflama deneyleri doğal numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler; Likit limit için Casagrande ve koni düşürme yöntemi, plastik limit deneyi, kil ve silt içeriğinin bulunması amacıyla hidrometre deneyi ve özgül ağırlığı bulmak için piknometre deneyleridir.

4.2.1.1. Kıvam limiti deneyleri

İnce daneli zeminlerde sınıflandırma yapabilmek için numunenin kıvam limitlerini bulmak gerekmektedir. Bu amaçla TS 1900-1'de belirtilen Casagrande, koni düşürme ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonrasında ince daneli malzemenin sınıflandırılması için TS 1500/2000 standardı kullanılmıştır. Şekil

4.4.'de kil zemin üzerinde Casagrande ve koni düşürme yöntemleriyle yapılan likit limit deneylerine ait fotoğraflar görülmektedir.



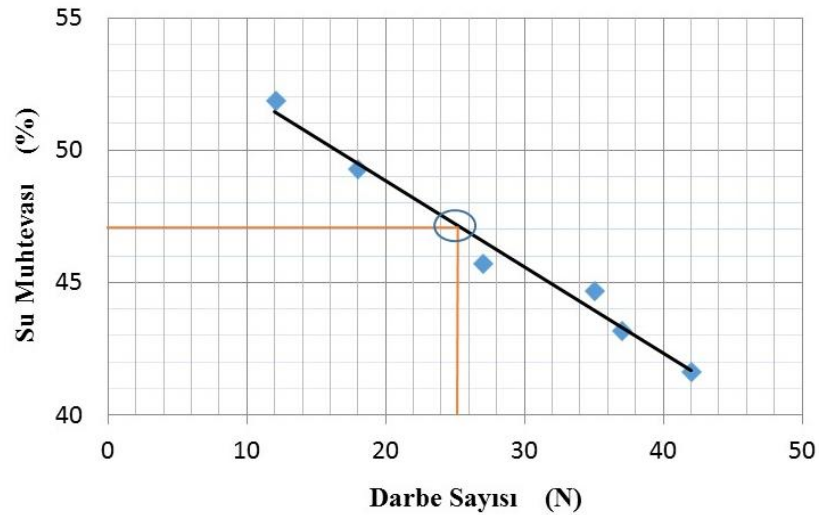
Şekil 4.4. Casagrande ve koni düşürme yöntemi ile likit limitin bulunması

Casagrande yönteminde, 200 gr kadar doğal zemin numunesine belli bir miktarda su katılıp homojen hale getirilene kadar karıştırılan zemin numunesi, deney aletine yaklaşık 1 cm kalınlığında olacak şekilde yatay olarak serilir. Standartta özellikleri belirtilen oluk açma bıçağıyla 2 mm oluk açılmakta ve deney aleti saniyede 2 sefer olmak üzere 10 mm yükseklikten düşürülmektedir. Bu düşürülme esnasında açılmış olan oyuk yaklaşık 13 mm uzunluğunda kapandığında deney sonlandırılmaktadır. Deney sonlandırıldıktan sonra su muhtevası için örnek alınmaktadır. Deney, bu şekilde vuruş sayıları 10 ile 50 arasına denk gelecek şekilde en az 4 kere tekrarlanmaktadır. Deney sonrasında 25 vuruşa denk gelen su içeriği o zeminin likit limitini (w_L) veren su muhtevasıdır.

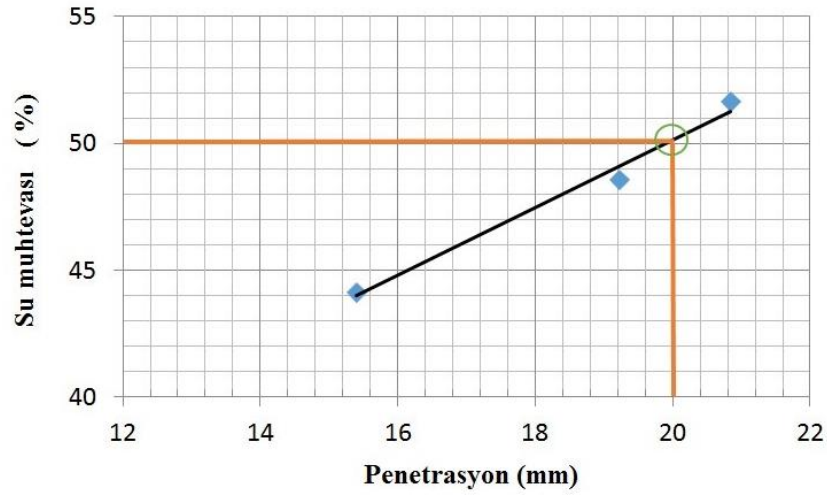
Düşen koni yönteminde, likit limit (w_L) kendi ağırlığında belirli bir yükseklikten düşen koninin, zemin numunesine yaptığı penetrasyon miktarı ile ilişkilendirilmektedir. Belirli bir su muhtevasında hazırlanan zemin numunesin 3 farklı noktasına koni serbest düşürülerek 5 saniye süreyle batması beklenir. Her bir düşme için penetrasyon miktarları not edilip ortalaması alınır. Penetrasyon 15 ile 25 mm arasına gelecek şekilde artan su muhtevalarında deney 3 kere tekrar edilir. Son olarak bir miktar numune alınıp su muhtevası ölçümü için 105°C etüve yerleştirilmektedir. 20 mm'lik batmaya denk gelen su muhtevası likit limit (w_L) değerini verir.

Plastik Limit (w_p), belirli bir su muhtevasında yuğrulan zeminin 3 mm kalınlığa geldiğinde çatladığı su içeriğidir. Zemin numunesi, 3 mm kalınlığa gelecek şekilde yuğrulur. Çatlaklar belirmeye başlayınca su muhtevası için örnek alınır.

Şekilde 4.5.'de Casagrande cihazı ile yapılan likit limit deneyi sonuçları görülmektedir. Şekilde 4.6.'da ise koni düşürme cihazı ile yapılan likit limit deneyi sonuçları görülmektedir.

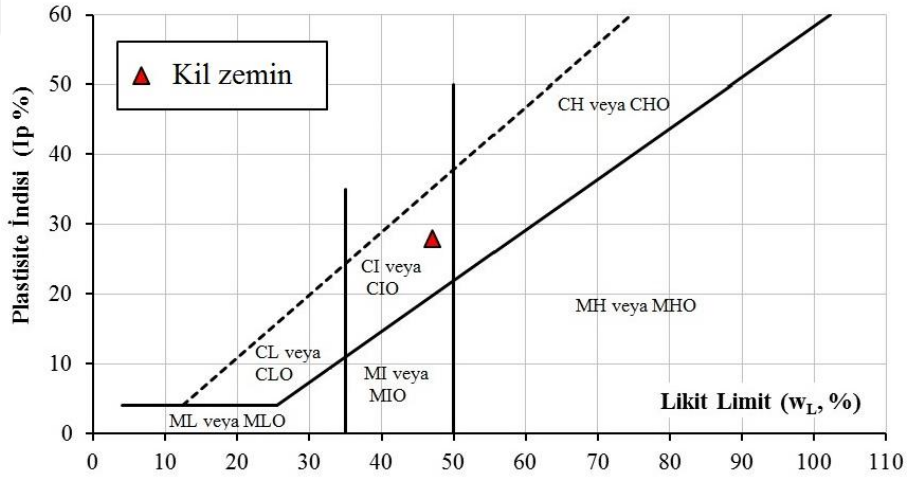


Şekil 4.5. Casagrande cihazı ile yapılan likit limit deney grafiği



Şekil 4.6. Düşen koni ile yapılan likit limit deney grafiği

Tablo 4.1.'de görüleceği üzere deneylerde kullanılan kilin, likit limiti (w_L) 47, plastik limiti (w_p) 17,80 ve plastisite indisi (I_p) 29,20 değerlerine sahiptir. Şekil 4.7.'den de takip edilebileceği gibi TS 1500/2000'e göre bu değerlere sahip kil zemin simgesi CI (orta plastisiteli kil) olarak isimlendirilmektedir.



Şekil 4.7. Kilin TS 1500/2000 plastisite kartındaki yeri

4.2.1.2. Özgül ağırlık deneyi

Bu deney TS1900-1/2006'da belirtildiği üzere, 50 cc³'lük piknometre olarak isimlendirilen şişelerde gerçekleştirilmiştir. Piknometreler öncelikle 105°C derece sıcaklıkta etüvde bekletilerek tamamen kurutulup boş olarak tartılmıştır. Sonrasında

piknometrelerin içerisine yaklaşık olarak 10 gr kadar numune yerleştirilip tartılmıştır. Sonrasında piknometrenin içerisine bir miktar su eklenip desikatör yardımıyla içerisindeki hava tamamen alınmıştır. Havası alınan piknometre kabı tamamen su ile doldurularak tekrar tartılmıştır. Tartma işleminden sonra piknometre tamamen boşaltılıp içerisi su ile doldurularak son bir tartım alınmıştır. Bu tartımlar arasındaki ilişkidenden de numunenin özgül ağırlığı 2,76 bulunmuştur. Deneylerle ilgili görseller Şekil 4.8.'de görülmektedir.



Şekil 4.8. Özgül ağırlık deneyi aşamaları

4.2.1.3. Elek analizi, hidrometre deneyleri

Bu çalışmada, deneylerde kullanılan zemin numunesinin dane dağılımını bulmak amacıyla TS1900-1/2006 standardına göre elek analizi ve hidrometre deneyleri yapılmıştır. Yıkamalı elek analizi deneyi 75 mikrondan daha büyük danelerin dane dağılım eğrisini çizmek amacıyla kullanılırken, hidrometre deneyi 75 mikrondan daha küçük dane yapısındaki numunelerin kil içeriğini belirlemek ve bunları dane dağılım eğrisinde göstermek amacıyla kullanılır. Deney aşamaları Şekil 4.9.'da, dane

dağılım eğrisi ise Şekil 4.2.'de gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre, numunenin % 49,50'si kil, 44,12'si silt ve % 6,38'i kumdur.



Şekil 4.9. Dane çapı dağılımının bulunması, hidrometre ve elek analizi deneyleri

4.2.2. Kompaksiyon deneyleri

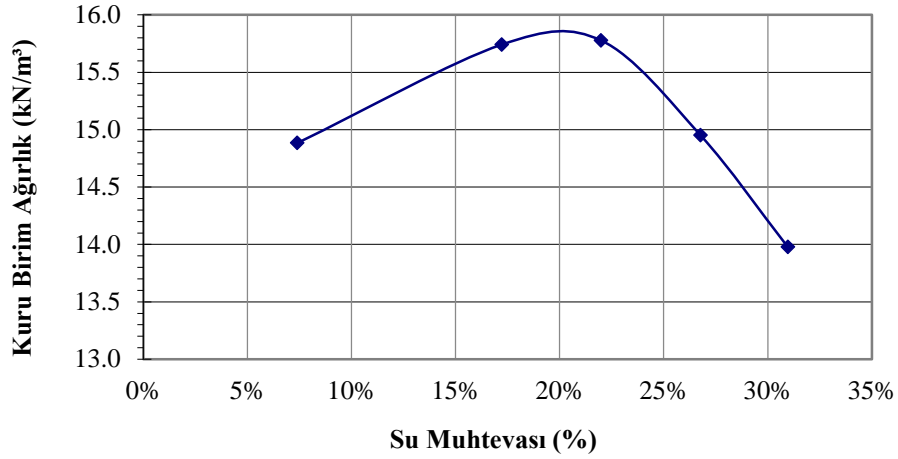
4.2.2.1. Standart Proktor deneyi

Bu deney TS1900-1'de belirttiği üzere 50 mm çapta olan 2,5 kg'lık tokmağın 305 mm yükseklikten aşağı serbest düşüm yapması esnasında meydana gelen enerji ile sıkıştırılması işlemidir. Tamamı 2 mm elekten geçen numuneler her biri 2,5 kg olacak şekilde beş ayrı kaba ayrılıp içerilerine sırasıyla 200-300-400-500 ve 600 gr su eklenilerek homojen hale gelene kadar karıştırılıp plastik poşetlerde bir gün bekletilmiştir.

Standart Proktor aleti ile zemin kalıba 3 tabakada sıkıştırılmış olup her bir tabaka için 25 vuruş yapılmıştır. Sıkışma işlemi de bittikten sonra su muhtevası için sıkıştırılmış zeminden örnek alınmıştır. Bu işlem tüm numunelerde uygulanmıştır. Sonrasında kuru birim hacim ağırlık- su muhtevası grafikleri çizilerek optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerine ulaşılmıştır. Şekil 4.10.'da standart kompaksiyon deneyi ve Şekil 4.11.'de ise deney sonuçlarını gösteren grafik görülmektedir. Grafikten maksimum kuru birim hacim ağırlığın $15,80 \text{ kN/m}^3$ ve optimum su muhtevasının (w_{opt}) %20,5 olduğu görülmektedir.



Şekil 4.10. Standart kompaksiyon deneyi



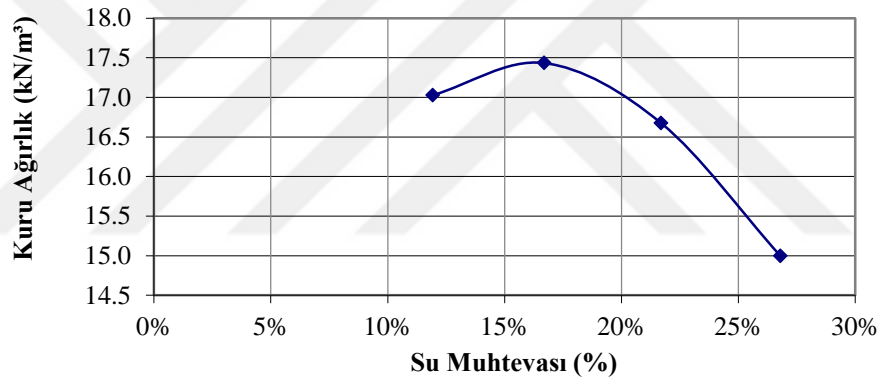
Şekil 4.11. Standart kompaksiyon deneyi grafiği

4.2.2.2. Modifiye Proktor deneyi

Bu deney TS1900-1’de belirttiği üzere 50 mm çapta olan 4,5 kg’lık tokmağın 45,8 cm yükseklikten aşağı serbest düşüş yapması esnasında meydana gelen enerji ile sıkıştırılması işlemidir. Tamamı 2 mm elekten geçen numuneler her biri 4,5 kg olacak şekilde beş ayrı kaba ayrılıp içerilerine sırasıyla 200-300-400-500 ve 600 gr su eklenilerek homojen hale gelene kadar karıştırılıp plastik poşetlerde bir gün bekletilmiştir. Modifiye Proktor aleti ile zemin kalıba 5 tabakada sıkıştırılmış olup her bir tabaka için 25 vuruş yapılmıştır. Sıkışma işlemi bittikten sonra su muhtevası için sıkıştırılmış zeminden örnek alınmıştır. Bu işlem tüm numunelerde yapılmıştır. Sonrasında kuru birim hacim ağırlık - su muhtevası grafikleri çizilerek optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerine ulaşılmıştır. Şekil 4.12.’de modifiye kompaksiyon deneyi ve Şekil 4.13.’de ise deney sonuçlarını gösteren grafik görülmektedir. Grafikten maksimum kuru birim hacim ağırlığın $17,45 \text{ kN/m}^3$ ve optimum su muhtevasının (w_{opt}) % 16,5 olduğu görülmektedir.



Şekil 4.12. Modifiye proktor deneyi yapılışı



Şekil 4.13. Modifiye proktor deneyi yapılışı

4.2.3. Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi

Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyi, ABD’de O.J. Porter tarafından hava alanı pistleri için geliştirilmiş olup ilerleyen zamanlarda karayollarına da uyarlanmış, dolgu malzemesi olarak kullanılacak grecin niteliği hakkında fikir sahibi olunmasını sağlayan, deney numunesi ile Kaliforniya kırma taşının kıyaslandığı çalışmadır. TS 1900-2 standardında belirtildiği üzere deneyde 19,35 mm çaplı bir pistonun zemine belirli bir hızda itilmesi ile oluşan yük-penetrasyon ilişkisi bulunur. Deneyde 2,5 ve 5,00 mm batmalarda meydana gelen yükler karşılaştırılıp büyük olanı CBR değeri olarak yazılır.

Bu tez çalışmasında doğal numune üzerinde kuru ve yaş olmak üzere iki adet CBR deneyi yapılmıştır. Yaş olarak yapılan deneyde numune 4 gün süre ile suda bekletilip, şişme değerleri ölçülmüştür. Ayrıca çalışmada, 6 mm - 12 mm ve 24 mm boylarındaki bazalt fiberler, kil zemine farklı oranlarda karıştırılıp 4 gün süreyle suda bekletildikten sonra deneye tabi tutulmuşlardır. Çalışmada bazalt fiberin, şişme ve zemin iyileştirmesine etkisi incelenmiştir. Şekil 4.14. ve Şekil 4.15.'de deney aşamaları görülmektedir.



Şekil 4.14. (a) Kil, bazalt fiber, 600 ml su, (b) kil zemine bazalt fiber ve su ilavesi, (c) rastgele karıştırılan bazalt fiberin son hali, (d) poşetleme, (e) sıkıştırma sonucu tartım, (f) 96 saat ıslatma, (g) ıslatma sonu şişme görünümü, (h) CBR okumaları, (i) CBR deney bitimi numune görünüşü



Şekil 4.15. (i) CBR deney bitimi numune alımı, (j) alt ve üst bölgeden alınan numuneler, (k) numunelerin etüve konması

4.3. Kil Zeminin Kimyasal Özellikleri

4.3.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu; optik kolon, numune hücresi ve görüntüleme sistemi olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır. Optik kolon kısmında; elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, ince elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler, demeti numune üzerinde odaklamak için objektif merceği, bu merceğe bağlı çeşitli çapta apertürler ve elektron demetinin numune yüzeyini taraması için tarama bobinleri yer almaktadır. Mercek sistemleri elektromanyetik alan ile elektron demetini inceltmekte veya numune üzerine odaklamaktadır. İletken numuneler ve yüksek vakumda çalışmaya uygun hale getirilmiş (kaplama vs. işlemler ile) yalıtkan numuneler yüksek vakumda iletken olmayan, organik, inorganik numuneler düşük vakumda (LFD Dedektörü) görüntüleme yapılabilmektedir. Tam ıslak ve hidrate olmuş, kirli ve gaz çıkaran

örnekler 4000 Pa'a kadar genişletilebilen vakum koşulları altında ikincil elektron görüntülemesi yapılabilmektedir. Görüntü sisteminde, elektron demeti ile numune girişimi sonucunda oluşan çeşitli elektron ve ışınları toplayan dedektörler, bunların sinyal çoğaltıcıları ve numune yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize tarayan manyetik bobinler bulunmaktadır (Sargem, 2019).

Başka bir deyişle, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM, Scanning Electron Microscope), incelenen örnek numunenin bir elektron demetinin taranması ve bu örnekten saçılan elektronların algılanıp görüntü haline getirilerek bilgisayar ekranına aktarılması şeklinde uygulanan topoğrafik bir inceleme yöntemidir. Ayrıca incelenen örneğin ilgili kısmının (3D) üç boyutlu görüntüsü elde edilebilmektedir (Ndepete ve Sert, 2017).

Şekil 4.16.'da Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü bünyesinde kullanılan SEM analizi cihazı görülmektedir.



Şekil 4.16. Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarındaki SEM analizi cihazı

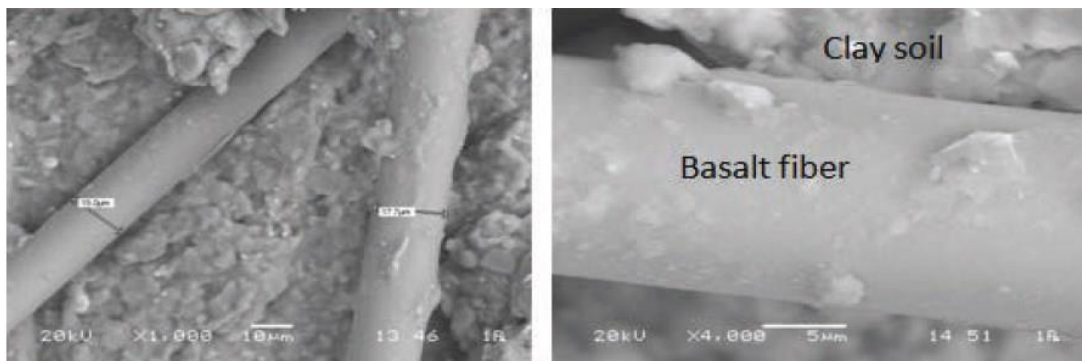
BÖLÜM 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, öncelikle kil zeminin ve bazalt fiberin mikro yapı özellikleri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi ile ortaya konmuş, sonrasında CBR deney sonuçları irdelenmiştir.

5.1. Kil ve Bazalt Fiberin Mikro Yapı Özellikleri

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi ile kil zemini ve bazalt fiberleri oluşturan yapı ortaya konmuştur.

Şekil 5.1.'de bazalt liflerinin bu çalışma için kullanılan kil zemin numunesindeki yerleri gösterilmektedir. Kil zemin parçacıkları bazalt liflerine yapışma eğilimindedir. Ayrıca, bu bazalt liflerin belirli oranlarda ilave edilmesi ile zemin ağı oluşturduğu ve şişmeye karşı bir engel teşkil ettiği belirtilmelidir. Mikroskobik gözlemler, kil zemin parçacıklarının davranışını bazalt liflerinin mevcudiyeti ile gözlemlemeyi mümkün kılar.



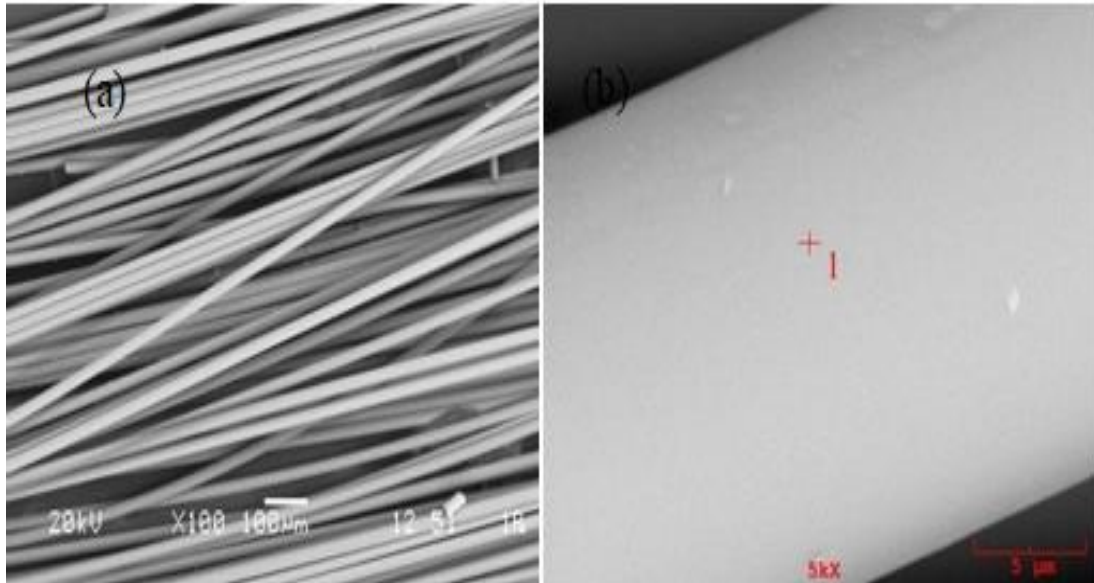
Şekil 5.1. Kil zeminde bazalt liflerinin mikroskobik gözlemi ve düzenlenmesi (Ocakbaşı ve Sert, 2017).

Şekil 5.2.'de kil zemin örneklerinin farklı çözünürlüklerde mikroskobik yapısı görülmektedir.



Şekil 5.2. SEM analizi: kil zeminin mikro yapısı

Şekil 5.3.'de bu çalışmada kullanılan bazalt fiberlerin farklı çözünürlüklerde mikroskobik yapısı gösterilmektedir. Bazalt fiberlerin mineralojik bileşimi de Tablo 5.1.'den izlenebilir.



Şekil 5.3. SEM analizi: bazalt fiber mikro yapısı (a) X100, (b) X5000 (Ndepete ve Sert, 2017).

Tablo 5.1. Bazalt fiberi oluşturan mineraller (SEM) (Ndepete ve Sert, 2017).

Mineral	Ağırlıkça (%)	Yoğunluk (c/s)
O	31,26	59,49
Fe	6,14	26,10
Si	37,61	316,48
Al	10,86	93,50
Mg	3,44	26,69
K	2,20	17,12
Ca	5,47	42,02
Na	3,01	17,07
Toplam	100,00	572,37

5.2. Numunelerde Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyi

Düzce'den alınan kil zemin üzerinde yürütülen deneylerde kullanılan numunelerin hazırlama aşamasında 3500 gr kuru kil numunesine 600 gr su katılarak optimum su muhtevası civarında numuneler elde edilmiş ve CBR kalıbına 3 kademedeki statik olarak sıkıştırılmışlardır. İlk olarak bazalt fiber katkısı olmadan doğal ve suya doymuş olarak hazırlanan numuneler üzerinde CBR deneyinde yükleme, silindir pistonun penetrasyon hızı dakikada 1,20 mm olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Eksenel yük okumaları alt ve üst bölge için her 0,50 mm'de bir alınmıştır. CBR deneyleri sonunda numunelerin su muhtevalarındaki değişimin gözlemlenebilmesi için alt ve üst bölgelerden ayrı ayrı örnekler alınmıştır. Doymuş numune için ise 96 saatlik ıslatma işlemine tabi tutulmuş numunede şişme değeri okunarak bu numune üzerinde gerçekleştirilen CBR okumaları aynı şekilde not alınmıştır.

Doğal ve suya doymuş katkısız numuneler (%0 bazalt fiber katkılı numuneler), bazalt fiberin farklı boy ve yüzdelerde ilave edilerek hazırlanan diğer numuneler ile karşılaştırma ve değerlendirme için şahit (örnek) numune olarak kullanılmışlardır.

5.2.1. Doğal numunede Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi

0 nolu deney numunesi, katkısız (%0 bazalt fiber oranına sahip) olup ıslatılma işlemine tabi tutulmadan CBR deneyine tabi tutularak eksenel yük okumaları alt ve üst bölge için her 0,50 mm'de bir alınmıştır. CBR değerleri ölçümlerinde maksimum

taşıma oranı değerleri 2,50 mm oturmaya karşılık gelen alt ve üst okumalarda gerçekleşmiştir.

CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %14,93, üst bölgede %18,31 olmuştur. Su muhtevası üst bölgede ($w_{üst}$) %19,53, alt bölgede (w_{alt}) %19,57 hesaplanmıştır.

5.2.2. Doğal suya doymun numunede Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi

1 nolu deney numunesi, katkısız (%0 bazalt fiber oranına sahip) olup 96 saatlik ıslatma işleminden sonra şişme 2,76 mm okunmuştur. CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %9,77, üst bölgede %5,24 olmuştur. Su muhtevası üst bölgede ($w_{üst}$) %25,72, alt bölgede (w_{alt}) %23,76 olarak hesaplanmıştır.

5.3. Bazalt Fiber Katkılı Numunelerde (CBR) Deneyleri

5.3.1. 6 mm boyunda bazalt fiber katkıli numunelerde (CBR) deneyleri

6 mm boyundaki bazalt fiber zemine ağırlıkça %0,05 - %0,10 - %0,15 - %0,20 ve %2,0 oranlarında ilave edilerek numuneler hazırlanmıştır.

5.3.1.1. 6 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,05 oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi

2a nolu deney numunesi, ağırlıkça %0,05 oranına karşılık gelen 6 mm boyutundaki 1,75 gr bazalt fiberin zemine rastgele azar azar ilave edilerek mümkün olduğunca topaklanmanın önüne geçecek şekilde karıştırılması ile hazırlanmıştır. 96 saatlik ıslatma işleminden sonra şişme değeri 2,46 mm okunmuştur. CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %18,04, üst bölgede %10,93 olmuştur. Su muhtevası üst bölgede ($w_{üst}$) %22,59, alt bölgede (w_{alt}) %21,34 hesaplanmıştır.

5.3.1.2. 6 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,10 oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi

2b nolu deney numunesi, ağırlıkça %0,10 oranına karşılık gelen 6 mm boyutundaki 3,50 gr bazalt fiberin zemine rastgele azar azar ilave edilerek mümkün olduğunca topaklanmanın önüne geçecek şekilde karıştırılması ile hazırlanmıştır. 96 saatlik ıslatma işleminden sonra şişme değeri 2,39 mm okunmuştur. CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %12,08, üst bölgede %5,42 olmuştur. Su muhtevası üst bölgede ($w_{üst}$) %24,66, alt bölgede (w_{alt}) %22,61 hesaplanmıştır.

5.3.1.3. 6 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,15 oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi

2c nolu deney numunesi, ağırlıkça %0,15 oranına karşılık gelen 6 mm boyutundaki 5,25 gr bazalt fiberin zemine rastgele azar azar ilave edilerek mümkün olduğunca topaklanmanın önüne geçecek şekilde karıştırılması ile hazırlanmıştır. 96 saatlik ıslatma işleminden sonra şişme değeri 0,77 mm okunmuştur. CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %24,35, üst bölgede %20,35 olmuştur. Su muhtevası üst bölgede ($w_{üst}$) %20,79, alt bölgede (w_{alt}) %20,65 hesaplanmıştır.

5.3.1.4. 6 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,20 oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi

2d nolu deney numunesi, ağırlıkça %0,20 oranına karşılık gelen 6 mm boyutundaki 7,00 gr bazalt fiberin zemine rastgele azar azar ilave edilerek mümkün olduğunca topaklanmanın önüne geçecek şekilde karıştırılması ile hazırlanmıştır. 96 saatlik ıslatma işleminden sonra şişme değeri 0,41 mm okunmuştur. CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %32,26, üst bölgede %28,44 olmuştur. Su muhtevası üst bölgede ($w_{üst}$) %20,21, alt bölgede (w_{alt}) %19,97 hesaplanmıştır.

5.3.1.5. 6 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %2,00 oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi

2e nolu deney numunesi, ağırlıkça %2,00 oranına karşılık gelen 6 mm boyutundaki 70,00 gr bazalt fiberin zemine rastgele azar azar ilave edilerek mümkün olduğunca topaklanmanın önüne geçecek şekilde karıştırılması ile hazırlanmıştır. 96 saatlik ıslatma işleminden sonra şişme değeri 5,65 mm okunmuştur. CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %5,51, üst bölgede %2,13 olmuştur. Su muhtevası üst bölgede ($w_{üst}$) %24,24, alt bölgede (w_{alt}) %27,29 hesaplanmıştır.

5.3.2. 12 mm boyunda bazalt fiber katkılı numunelerde (CBR) deneyleri

12 mm boyundaki bazalt fiber zemine ağırlıkça %0,05 - %0,10 - %0,15 ve %0,20 oranlarında ilave edilerek numuneler hazırlanmıştır.

5.3.2.1. 12 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,05 oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi

3a nolu deney numunesi, ağırlıkça %0,05 oranına karşılık gelen 12 mm boyutundaki 1,75 gr bazalt fiberin zemine rastgele azar azar ilave edilerek mümkün olduğunca topaklanmanın önüne geçecek şekilde karıştırılması ile hazırlanmıştır. 96 saatlik ıslatma işleminden sonra şişme değeri 0,66 mm okunmuştur. CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %20,53, üst bölgede %17,15 olmuştur. Su muhtevası üst bölgede ($w_{üst}$) %19,02, alt bölgede (w_{alt}) %18,78 hesaplanmıştır.

5.3.2.2. 12 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,10 oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi

3b nolu deney numunesi, ağırlıkça %0,10 oranına karşılık gelen 12 mm boyutundaki 3,50 gr bazalt fiberin zemine rastgele azar azar ilave edilerek mümkün olduğunca

topaklanmanın önüne geçecek şekilde karıştırılması ile hazırlanmıştır. 96 saatlik ıslatma işleminden sonra şişme değeri 0,57 mm okunmuştur. CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %22,75, üst bölgede %22,21 olmuştur. Su muhtevası üst bölgede ($w_{üst}$) %20,79, alt bölgede (w_{alt}) %20,56 hesaplanmıştır.

5.3.2.3. 12 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,15 oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi

3c nolu deney numunesi, ağırlıkça %0,15 oranına karşılık gelen 12 mm boyutundaki 5,25 gr bazalt fiberin zemine rastgele azar azar ilave edilerek mümkün olduğunca topaklanmanın önüne geçecek şekilde karıştırılması ile hazırlanmıştır. 96 saatlik ıslatma işleminden sonra şişme değeri 0,53 mm okunmuştur. CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %24,97, üst bölgede %20,97 olmuştur. Su muhtevası üst bölgede ($w_{üst}$) %20,77, alt bölgede (w_{alt}) %20,47 hesaplanmıştır.

5.3.2.4. 12 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,20 oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi

3d nolu deney numunesi, ağırlıkça %0,20 oranına karşılık gelen 12 mm boyutundaki 7,00 gr bazalt fiberin zemine rastgele azar azar ilave edilerek mümkün olduğunca topaklanmanın önüne geçecek şekilde karıştırılması ile hazırlanmıştır. 96 saatlik ıslatma işleminden sonra şişme değeri 0,73 mm okunmuştur. CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %23,73, üst bölgede %17,15 olmuştur. Su muhtevası üst bölgede ($w_{üst}$) %21,54, alt bölgede (w_{alt}) %20,78 hesaplanmıştır.

5.3.3. 24 mm boyunda bazalt fiber katkılı numunelerde (CBR) deneyleri

24 mm boyundaki bazalt fiber zemine ağırlıkça %0,05 - %0,10 - %0,15 - %0,20 - %0,25 - %0,50 - %1,0 - %1,50 ve %2,0 oranlarında ilave edilerek numuneler hazırlanmıştır.

5.3.3.1. 24 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,05 oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi

4a nolu deney numunesi, ağırlıkça %0,05 oranına karşılık gelen 24 mm boyutundaki 1,75 gr bazalt fiberin zemine rastgele azar azar ilave edilerek mümkün olduğunca topaklanmanın önüne geçecek şekilde karıştırılması ile hazırlanmıştır. 96 saatlik ıslatma işleminden sonra şişme değeri 2,09 mm okunmuştur. CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %11,02, üst bölgede %4,27 olmuştur. Su muhtevası üst bölgede ($w_{üst}$) %27,91, alt bölgede (w_{alt}) %21,57 hesaplanmıştır.

5.3.3.2. 24 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,10 oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi

4b nolu deney numunesi, ağırlıkça %0,10 oranına karşılık gelen 24 mm boyutundaki 3,50 gr bazalt fiberin zemine rastgele azar azar ilave edilerek mümkün olduğunca topaklanmanın önüne geçecek şekilde karıştırılması ile hazırlanmıştır. 96 saatlik ıslatma işleminden sonra şişme değeri 2,26 mm okunmuştur. CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %11,82, üst bölgede %6,31 olmuştur. Su muhtevası üst bölgede ($w_{üst}$) %24,37, alt bölgede (w_{alt}) %22,27 hesaplanmıştır.

5.3.3.3. 24 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,15 oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi

4c nolu deney numunesi, ağırlıkça %0,15 oranına karşılık gelen 24 mm boyutundaki 5,25 gr bazalt fiberin zemine rastgele azar azar ilave edilerek mümkün olduğunca topaklanmanın önüne geçecek şekilde karıştırılması ile hazırlanmıştır. 96 saatlik ıslatma işleminden sonra şişme değeri 0,455 mm okunmuştur. CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %26,12, üst bölgede %20,35 olmuştur. Su muhtevası üst bölgede ($w_{üst}$) %20,45, alt bölgede (w_{alt}) %20,34 hesaplanmıştır.

5.3.3.4. 24 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,20 oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi

4d nolu deney numunesi, ağırlıkça %0,20 oranına karşılık gelen 24 mm boyutundaki 7,00 gr bazalt fiberin zemine rastgele azar azar ilave edilerek mümkün olduğunca topaklanmanın önüne geçecek şekilde karıştırılması ile hazırlanmıştır. 96 saatlik ıslatma işleminden sonra şişme değeri 0,705 mm okunmuştur. CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %21,86, üst bölgede %15,46 olmuştur. Su muhtevası üst bölgede ($w_{üst}$) %21,09, alt bölgede (w_{alt}) %20,66 hesaplanmıştır.

5.3.3.5. 24 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,25 oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi

4e nolu deney numunesi, ağırlıkça %0,25 oranına karşılık gelen 24 mm boyutundaki 8,25 gr bazalt fiberin zemine rastgele azar azar ilave edilerek mümkün olduğunca topaklanmanın önüne geçecek şekilde karıştırılması ile hazırlanmıştır. 96 saatlik ıslatma işleminden sonra şişme değeri 1,43 mm okunmuştur. CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %24,43, üst bölgede %12,97 olmuştur. Su muhtevası üst bölgede ($w_{üst}$) %22,00, alt bölgede (w_{alt}) %19,40 hesaplanmıştır.

5.3.3.6. 24 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %0,50 oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi

4f nolu deney numunesi, ağırlıkça %0,50 oranına karşılık gelen 24 mm boyutundaki 17,50 gr bazalt fiberin zemine rastgele azar azar ilave edilerek mümkün olduğunca topaklanmanın önüne geçecek şekilde karıştırılması ile hazırlanmıştır. 96 saatlik ıslatma işleminden sonra şişme değeri 1,98 mm okunmuştur. CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %16,17, üst bölgede %3,73 (5,00 mm için %3,79) olmuştur. Su muhtevası üst bölgede ($w_{üst}$) %25,51, alt bölgede (w_{alt}) %21,03 hesaplanmıştır.

5.3.3.7. 24 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %1,00 oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi

4g nolu deney numunesi, ağırlıkça %1,00 oranına karşılık gelen 24 mm boyutundaki 35,00 gr bazalt fiberin zemine rastgele azar azar ilave edilerek mümkün olduğunca topaklanmanın önüne geçecek şekilde karıştırılması ile hazırlanmıştır. 96 saatlik ıslatma işleminden sonra şişme değeri 4,54 mm okunmuştur. CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %9,06, üst bölgede %3,55 (5,00 mm için %3,59) olmuştur. Su muhtevası üst bölgede ($w_{üst}$) %26,27, alt bölgede (w_{alt}) %23,20 hesaplanmıştır.

5.3.3.8. 24 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %1,50 oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi

4h nolu deney numunesi, ağırlıkça %1,50 oranına karşılık gelen 24 mm boyutundaki 52,50 gr bazalt fiberin zemine rastgele azar azar ilave edilerek mümkün olduğunca topaklanmanın önüne geçecek şekilde karıştırılması ile hazırlanmıştır. 96 saatlik ıslatma işleminden sonra şişme değeri 5,43 mm okunmuştur. CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %4,71, üst bölgede %1,87 (5,00 mm için %2,06) olmuştur. Su muhtevası üst bölgede ($w_{üst}$) %27,00, alt bölgede (w_{alt}) %24,92 hesaplanmıştır.

5.3.3.9. 24 mm boyunda bazalt fiberin ağırlıkça %2,00 oranında ilave edildiği numunede (CBR) deneyi

41 nolu deney numunesi, ağırlıkça %2,00 oranına karşılık gelen 24 mm boyutundaki 70,00 gr bazalt fiberin zemine rastgele azar azar ilave edilerek mümkün olduğunca topaklanmanın önüne geçecek şekilde karıştırılması ile hazırlanmıştır. 96 saatlik ıslatma işleminden sonra şişme değeri 5,52 mm okunmuştur. CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %5,15, üst bölgede %1,56 (5,00 mm için %1,76) olmuştur. Su muhtevası üst bölgede ($w_{üst}$) %27,57, alt bölgede (w_{alt}) %24,61 hesaplanmıştır.

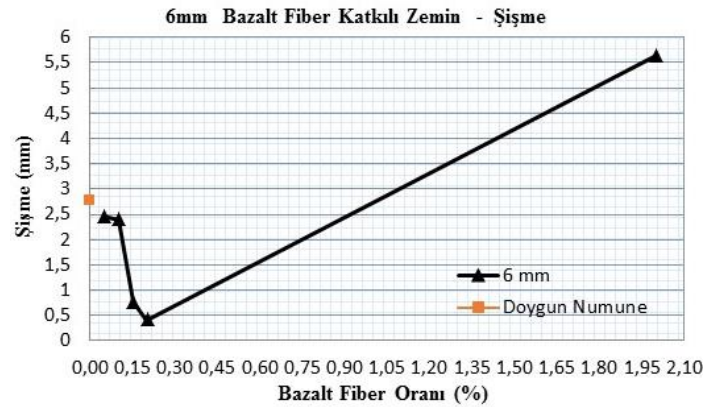
5.4. Kil Zeminde Bazalt Fiber Katkısının Şişmeye Etkisi

Kil zemine bazalt fiber ilave edilmeden hazırlanan 0 nolu şahit (örnek) numunede 96 saatlik ıslatma işleminden sonra şişme değeri 2,76 mm olarak okunmuştur.

6 mm boyundaki bazalt fiberin zemine ağırlıkça %0,05 - %0,10 - %0,15 - %0,20 ve %2,0 oranlarında ilave edilerek hazırlanan numunelerde en düşük şişme değeri %0,20 oranında bazalt fiber katılan numunede 0,41 mm olmuştur. Bazalt fiber katkılarının zemin şişme değerlerine etkisi Tablo 5.2. ve Şekil 5.4.'de gösterilmiştir.

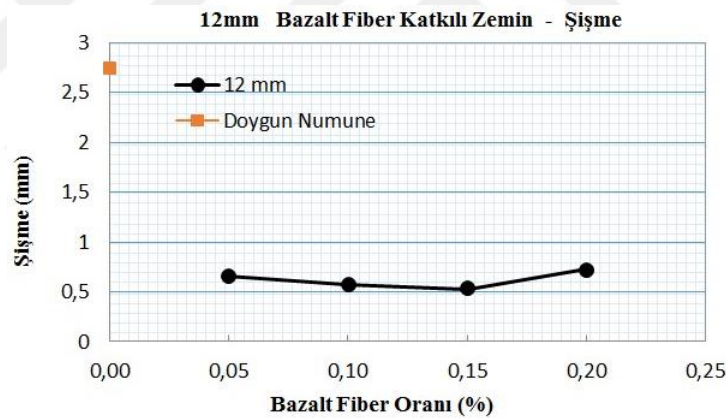
Tablo 5.2. Bazalt fiber katkılı zeminin şişme değerleri tablosu

		Bazalt Fiber Oranı (%)									
		0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.50	1.00	1.50	2.00
Doygun Numune		2.76									
Bazalt Fiber Boyu (mm)	6 mm	2.46	2.39	0.77	0.41						5.65
	12 mm	0.66	0.57	0.53	0.73						
	24 mm	2.09	2.26	0.455	0.71	1.43	1.98	4.54	5.43	5.52	



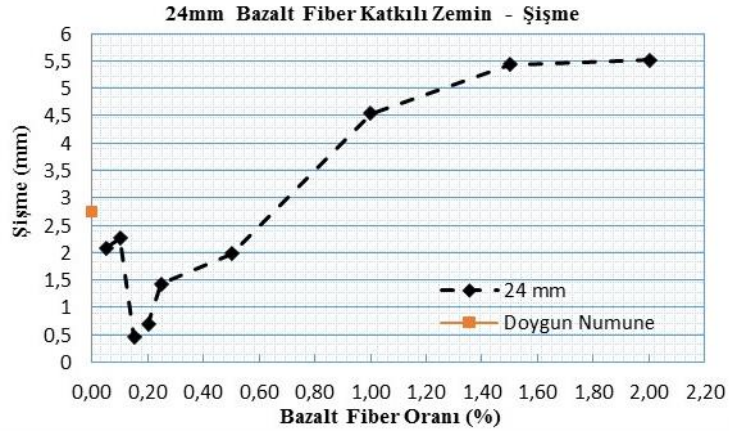
Şekil 5.4. 6 mm boyutlarındaki bazalt fiber katkı zeminin şişme değerleri grafiği

12 mm boyundaki bazalt fiberin zemine ağırlıkça %0,05 - %0,10 - %0,15 ve %0,20 oranlarında ilave edilerek hazırlanan numunelerde en düşük şişme değeri %0,15 oranında bazalt fiber katılan numunede 0,53 mm olmuştur. Bazalt fiber katkılarının zemin şişme değerlerine etkisi Tablo 5.2. ve Şekil 5.5.'de gösterilmiştir.



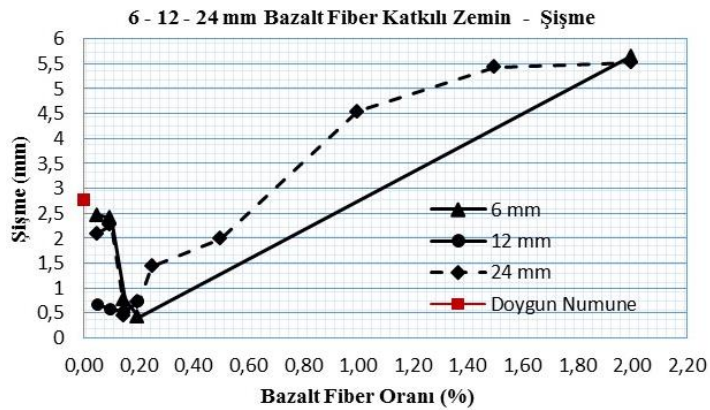
Şekil 5.5. 12 mm boyutlarındaki bazalt fiber katkı zeminin şişme değerleri grafiği

24 mm boyundaki bazalt fiberin zemine ağırlıkça %0,05 - %0,10 - %0,15 - %0,20 - %0,25 - %0,50 - %1,0 - %1,50 ve %2,0 oranlarında ilave edilerek hazırlanan numunelerde en düşük şişme değeri %0,15 oranında bazalt fiber katılan numunede 0,455 mm olmuştur. Bazalt fiber katkılarının zemin şişme değerlerine etkisi Tablo 5.2. ve Şekil 5.6.'da gösterilmiştir.

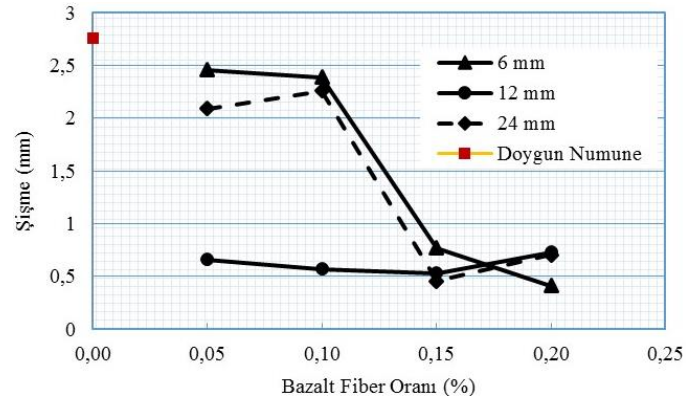


Şekil 5.6. 24 mm boyutlarındaki bazalt fiber katkıli zeminin şişme değerleri grafiği

6 - 12 - 24 mm boylarındaki bazalt fiberlerin zemine ağırlıkça %0,05 - %0,10 - %0,15 - %0,20 - %0,25 - %0,50 - %1,0 - %1,50 ve %2,0 oranlarında ilave edilerek hazırlanan numunelerde en düşük zemin şişme değeri; 6 mm boyunda bazalt fiberin %0,20 oranında katıldığı numunede 0,41 mm okunmuş ve şahit numune ile karşılaştırıldığında 6,73 kat iyileşme tespit edilmiştir. En yüksek şişme değeri ise 6 mm boyunda bazalt fiberin %2,00 oranında katıldığı numunede 5,65 mm okunmuştur. 6 - 12 - 24 mm boylarındaki bazalt fiber katkılarının zemin şişme değerlerine etkisi Şekil 5.7.'de gösterilmiştir. Ayrıca iyileşmenin daha net görülebilmesi için 6 - 12 - 24 mm boyutlarındaki bazalt fiberin zemine ağırlıkça %0,05 - %0,10 - %0,15 - %0,20 oranlarında katıldığı durumlarda ortaya çıkan şişme değerleri Şekil 5.8.'de ayrıca gösterilmiştir.



Şekil 5.7. 6-12-24 mm boyutlarındaki bazalt fiber katkıli zeminin şişme değerleri grafiği



Şekil 5.8. 6-12-24 mm boyutlarındaki bazalt fiberin %0,05-%0,10-%0,15-%0,20 oranlarında katıldığı zeminin şişme değerleri grafiği

Tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde belirli bir optimum aralıkta (%0,15 - %0,20) bazalt fiber katkısının zemin içinde şişmeye karşı zemin - fiber ağı oluşturabildiği ve şişmeyi azalttığı görülmektedir. Fakat bu optimum aralıktan sonra bazalt fiberin zemin içerisinde boşluk suyu yolları (drenler) oluşturması nedeniyle sağlıklı bir zemin - fiber ağı meydana getiremediği ve şişmenin arttığı düşünülmektedir.

5.5. Kil Zeminde Bazalt Fiber Katkısının Taşıma Gücü Oranına Etkisi

5.5.1. Kil zeminde bazalt fiber oranının taşıma gücü oranına etkisi

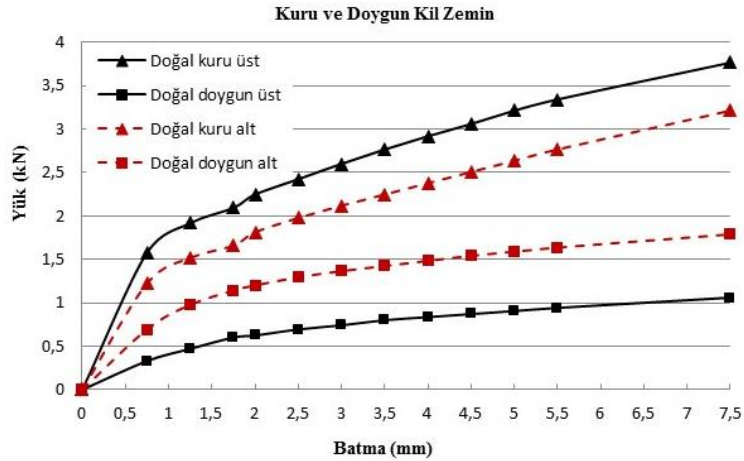
Tüm numuneler CBR deneyine tabi tutularak eksenel yük okuma değerleri alt ve üst bölgede her 0.50 mm batma için alınmıştır. CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı değerleri 2,50 mm oturmaya karşılık gelen alt ve üst okumalarda gerçekleşmiştir. Tablo 5.3.'de CBR deneyinde elde edilen yük ve taşıma gücü oranları gösterilmiştir.

Tablo 5.3. CBR okumaları ve taşıma gücü oranları tablosu

Deney No	Bazalt Fiber boyu (mm)	Bazalt Fiber oranı (%)	Su Muhtevası (w), (%)		Yük (kN)				Taşıma Gücü Oranı CBR (%)			
			üst	alt	üst		alt		üst		alt	
					2,50	5,00	2,50	5,00	2,50	5,00	2,50	5,00
0	yok	Doğal	19,53	19,57	2,42	3,21	1,98	2,64	18,31	16,06	14,93	13,18
1	yok	Doymun	25,72	23,76	0,69	0,91	1,29	1,59	5,24	4,53	9,77	7,94
2a		0,05	22,59	21,34	1,45	1,88	2,39	2,95	10,93	9,41	18,04	14,77
2b		0,10	24,66	22,61	0,72	0,94	1,60	2,00	5,42	4,71	12,08	10,00
2c	6 mm	0,15	20,79	20,65	2,69	3,59	3,22	3,86	20,35	17,94	24,35	19,29
2d		0,20	20,21	19,97	3,76	4,75	4,27	5,13	28,44	23,77	32,26	25,65
2e		2,00	24,24	27,29	0,28	0,46	0,73	0,94	2,13	2,29	5,51	4,71
3a		0,05	19,02	18,78	2,72	3,32	2,27	2,86	20,53	16,59	17,15	14,29
3b	12 mm	0,10	20,79	20,56	2,94	3,61	3,01	3,79	22,21	18,06	22,75	18,94
3c		0,15	20,77	20,47	2,78	3,56	3,31	3,94	20,97	17,82	24,97	19,71
3d		0,20	21,54	20,78	2,27	2,71	3,14	3,71	17,15	13,53	23,73	18,53
4a		0,05	27,91	21,57	0,56	0,74	1,46	1,80	4,27	3,71	11,02	9,00
4b		0,10	24,37	22,27	0,84	1,05	1,56	1,93	6,31	5,24	11,82	9,65
4c		0,15	20,45	20,34	2,69	3,75	3,46	4,11	20,35	18,77	26,12	20,53
4d		0,20	21,09	20,66	2,05	2,87	2,89	3,59	15,46	14,35	21,86	17,94
4e	24 mm	0,25	22,00	19,40	1,72	2,24	3,23	3,87	12,97	11,18	24,43	19,35
4f		0,50	25,51	21,03	0,49	0,76	2,14	2,51	3,73	3,79	16,17	12,53
4g		1,00	26,27	23,20	0,47	0,72	1,20	1,53	3,55	3,59	9,06	7,65
4h		1,50	27,00	24,92	0,25	0,41	0,62	0,81	1,87	2,06	4,71	4,03
4ı		2,00	27,57	24,61	0,21	0,35	0,68	0,94	1,56	1,76	5,15	4,71

0 nolu deney numunesi, bazalt fiber katkısı bulunmayan ve suda ıslatılma işlemine tabi tutulmadan CBR kalıbına sıkıştırma işleminden sonra doğrudan CBR deneyi uygulanan numune olup CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %14,93, üst bölgede %18,31 olmuştur.

1 nolu deney numunesi, bazalt fiber katkısı bulunmayan ve suda ıslatılma işlemine tabi tutulduktan sonra CBR deneyi uygulanan numune olup, CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %9,77, üst bölgede %5,24 olmuştur. Şekil 5.9.'da kuru ve suya doymun numunenin batmaya karşılık yük değerleri grafiği verilmektedir.



Şekil 5.9. Kuru ve doymun kil zeminde CBR deneyinde yük - batma değerleri

6 mm bazalt fiber katkıli kil zeminde CBR değerleri şu şekilde özetlenebilir;

2a nolu deney numunesi, zemine ağırlıkça %0,05 oranına karşılık gelen 1,75 gr bazalt fiberin rastgele ilave edilerek hazırlanan numune olup CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %18,04, üst bölgede %10,93 olmuştur.

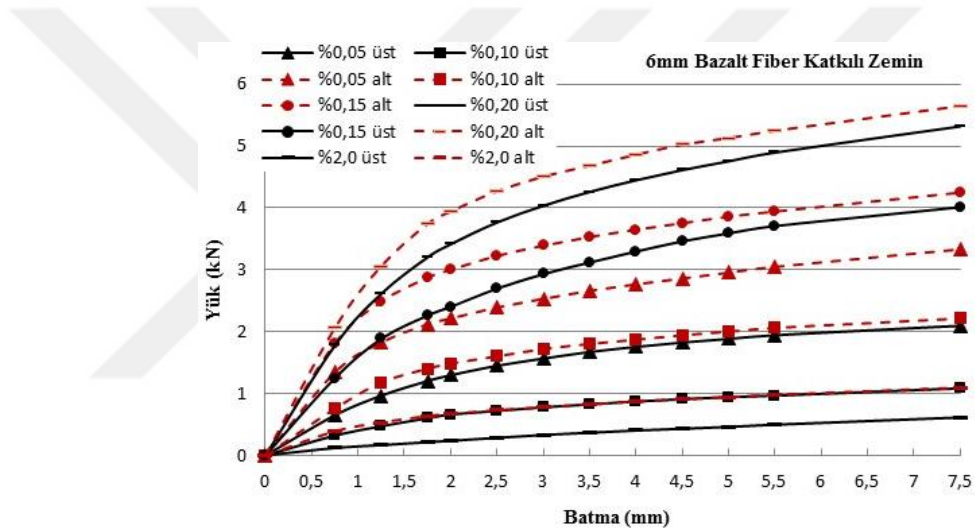
2b nolu deney numunesi, zemine ağırlıkça %0,10 oranına karşılık gelen 3,50 gr bazalt fiberin rastgele ilave edilerek hazırlanan numune olup CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %12,08, üst bölgede %5,42 olmuştur.

2c nolu deney numunesi, zemine ağırlıkça %0,15 oranına karşılık gelen 5,25 gr bazalt fiberin rastgele ilave edilerek hazırlanan numune olup CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %24,35, üst bölgede %20,35 olmuştur.

2d nolu deney numunesi, zemine ağırlıkça %0,20 oranına karşılık gelen 7,00 gr bazalt fiberin rastgele ilave edilerek hazırlanan numune olup CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %32,26, üst bölgede %28,44 olmuştur.

2e nolu deney numunesi, zemine ağırlıkça %2,00 oranına karşılık gelen 70,00 gr bazalt fiberin rastgele ilave edilerek hazırlanan numune olup CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %5,51, üst bölgede %2,13 olmuştur.

6 mm bazalt fiber katkılı kil zeminin CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma gücü oranı bazalt fiberin zemine ağırlıkça %0,20 ilave edildiği numunede 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %32,26 olup şahit numune ile karşılaştırıldığında 3,30 kat bir iyileşme sağlanmıştır. Şekil 5.10.'da 6 mm bazalt fiber katkılı numunelerin CBR deneyinde elde edilen yük-batma değerleri verilmiştir.



Şekil 5.10. 6 mm bazalt fiber katkılı numunelerin CBR deneyinde yük - batma değerleri

12 mm bazalt fiber katkılı kil zeminde CBR değerleri şu şekilde özetlenebilir;

3a nolu deney numunesi, zemine ağırlıkça %0,05 oranına karşılık gelen 1,75 gr bazalt fiberin rastgele ilave edilerek hazırlanan numune olup CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %20,53, üst bölgede %17,15 olmuştur.

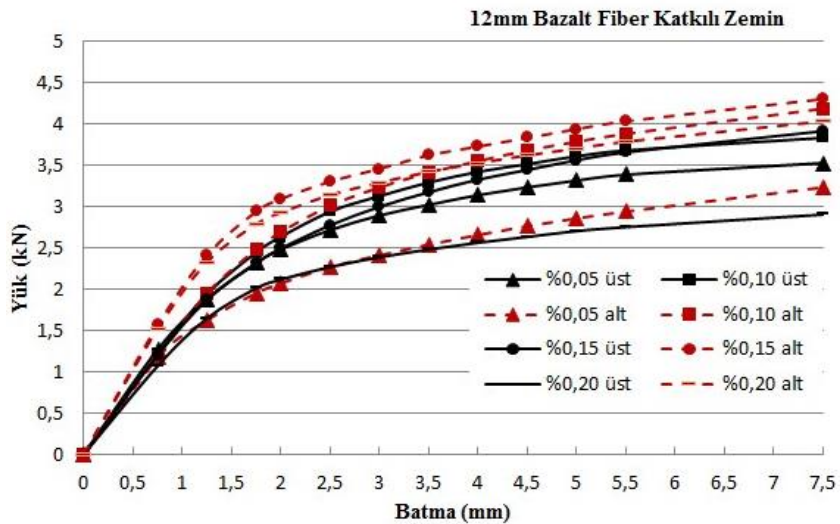
3b nolu deney numunesi, zemine ağırlıkça %0,10 oranına karşılık gelen 3,50 gr bazalt fiberin rastgele ilave edilerek hazırlanan numune olup CBR değerleri

ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %22,75, üst bölgede %22,21 olmuştur.

3c nolu deney numunesi, zemine ağırlıkça %0,15 oranına karşılık gelen 5,25 gr bazalt fiberin rastgele ilave edilerek hazırlanan numune olup CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %24,97, üst bölgede %20,97 olmuştur.

3d nolu deney numunesi, zemine ağırlıkça %0,20 oranına karşılık gelen 7,00 gr bazalt fiberin rastgele ilave edilerek hazırlanan numune olup CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %23,73, üst bölgede %17,15 olmuştur.

12 mm bazalt fiber katkılı kil zeminin CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma gücü oranı bazalt fiberin zemine ağırlıkça %0,15 ilave edildiği numunede 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %24,97 olup şahit numune ile karşılaştırıldığında 2,56 kat bir iyileşme sağlanmıştır. Şekil 5.11.'de 12 mm bazalt fiber katkılı numunelerin CBR deneyinde elde edilen yük-batma değerleri verilmiştir.



Şekil 5.11. 12 mm bazalt fiber katkılı numunelerin CBR deneyinde yük - batma değerleri

24 mm bazalt fiber katkılı kil zeminde CBR değerleri şu şekilde özetlenebilir;

4a nolu deney numunesi, zemine ağırlıkça %0,05 oranına karşılık gelen 1,75 gr bazalt fiberin rastgele ilave edilerek hazırlanan numune olup CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %11,02, üst bölgede %4,27 olmuştur.

4b nolu deney numunesi, zemine ağırlıkça %0,10 oranına karşılık gelen 3,50 gr bazalt fiberin rastgele ilave edilerek hazırlanan numune olup CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %11,82, üst bölgede %6,31 olmuştur.

4c nolu deney numunesi, zemine ağırlıkça %0,15 oranına karşılık gelen 5,25 gr bazalt fiberin rastgele ilave edilerek hazırlanan numune olup CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %26,12, üst bölgede %20,35 olmuştur.

4d nolu deney numunesi, zemine ağırlıkça %0,20 oranına karşılık gelen 7,00 gr bazalt fiberin rastgele ilave edilerek hazırlanan numune olup CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %21,86, üst bölgede %15,46 olmuştur.

4e nolu deney numunesi, zemine ağırlıkça %0,25 oranına karşılık gelen 8,25 gr bazalt fiberin rastgele ilave edilerek hazırlanan numune olup CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %24,43, üst bölgede %12,97 olmuştur.

4f nolu deney numunesi, zemine ağırlıkça %0,50 oranına karşılık gelen 17,50 gr bazalt fiberin rastgele ilave edilerek hazırlanan numune olup CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %16,17, üst bölgede %3,73 (5,00 mm için %3,79) olmuştur.

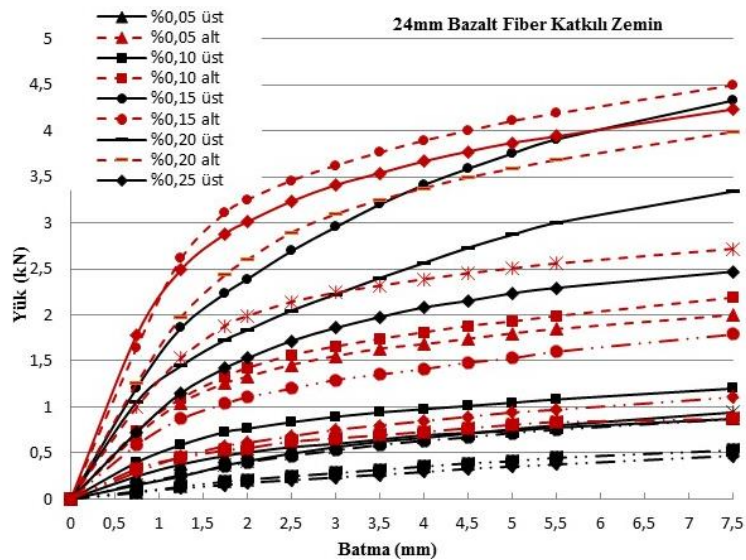
4g nolu deney numunesi, zemine ağırlıkça %1,00 oranına karşılık gelen 35,00 gr bazalt fiberin rastgele ilave edilerek hazırlanan numune olup CBR değerleri

ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %9,06, üst bölgede %3,55 (5,00 mm için %3,59) olmuştur.

4h nolu deney numunesi, zemine ağırlıkça %1,50 oranına karşılık gelen 52,50 gr bazalt fiberin rastgele ilave edilerek hazırlanan numune olup CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %4,71, üst bölgede %1,87 (5,00 mm için %2,06) olmuştur.

4ı nolu deney numunesi, zemine ağırlıkça %2,00 oranına karşılık gelen 70,00 gr bazalt fiberin rastgele ilave edilerek hazırlanan numune olup CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma oranı 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %5,15, üst bölgede %1,56 (5,00 mm için %1,76) olmuştur.

24 mm bazalt fiber katkılı kil zeminin CBR değerleri ölçümlerinde maksimum taşıma gücü oranı bazalt fiberin zemine ağırlıkça %0,15 ilave edildiği numunede 2,50 mm oturmaya karşılık alt bölgede %26,12 olup şahit numune ile karşılaştırıldığında 2,67 kat bir iyileşme sağlanmıştır. Şekil 5.12.'de 24 mm bazalt fiber katkılı numunelerin CBR deneyinde elde edilen yük-batma değerleri verilmiştir.



Şekil 5.12. 24 mm bazalt fiber katkılı numunelerin CBR deneyinde yük - batma değerleri

Sonuç olarak, 6 - 12 - 24 mm boylarında bazalt fiberin zemine ağırlıkça %0,05 - %0,10 - %0,15 - %0,20 - %0,25 - %0,50 - %1,0 - %1,50 ve %2,0 oranlarında ilave edilerek hazırlanan doymuş tüm numunelerin tamamında en yüksek taşıma gücü oranı, 6 mm bazalt fiberin zemine ağırlıkça %0,20 oranında katıldığı numunede 3,30 kat olarak elde edilmiştir. Taşıma gücü oranının en düşük olduğu değer ise 24 mm bazalt fiberin zemine ağırlıkça %2,0 oranında katıldığı numunede 2,50 mm oturmaya karşılık üst bölgede %1,56 olarak ölçülmüştür. Şahit numunenin 2,50 mm oturmaya karşılık üst bölgede %5,24 değeri göz önüne alındığında bu değer taşıma gücü oranının da 3,36'da 1'e düşüşü ifade etmektedir.

Genel olarak kil zemine ağırlıkça %0,05 - %0,10 - %0,15 ve %0,20 oranlarında bazalt fiber ilave edilmesi taşıma oranında artış sağlamıştır. Fakat bazalt fiber oranının belirli bu optimum aralıktan (%0,15 ve %0,20) fazla olması durumunda taşıma gücü oranında bir düşüşe yaşanmaktadır. Bazalt fiber içeriğinin belirli bir orandan daha fazla olması, zemin içinde fiberlerin kümeler halinde topaklanmasına ve zemin içinde dağılımının heterojen olmasına sebep olmaktadır. Bu durum da fiber katkısının zemin içindeki faydasını azaltmaktadır.

BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 6 mm, 12 mm ve 24 mm boylarındaki bazalt fiberin zemine ağırlıkça %0,05 - %0,10 - %0,15 - %0,20 - %0,25 - %0,50 - %1,0 - %1,50 - %2,0 değerlerinde ilave edilmesi ile şişme ve dayanım değerlerindeki değişim gözlemlenmiştir.

6 mm boyundaki bazalt fiberin zemine ağırlıkça %0,20 oranında katıldığı numunede 0,41 mm şişme meydana gelmiş ve şahit numune ile karşılaştırıldığında 6,73 kat iyileşme tespit edilmiştir.

12 mm boyundaki bazalt fiberin zemine ağırlıkça %0,15 oranında katıldığı numunede 0,53 mm şişme meydana gelmiş ve şahit numune ile karşılaştırıldığında 5,21 kat iyileşme tespit edilmiştir.

24 mm boyundaki bazalt fiberin zemine ağırlıkça %0,15 oranında katıldığı numunede 0,455 mm şişme meydana gelmiş ve şahit numune ile karşılaştırıldığında 6,00 kat iyileşme tespit edilmiştir.

Şişmenin en yüksek olduğu değerler ise 6 mm ve 24 mm boyundaki bazalt fiberlerin zemine ağırlıkça %2,0 oranında katıldığı numunelerde sırasıyla 5,65 mm ve 5,52 mm olarak ölçülmüştür.

CBR deneyleri sonucu taşıma gücü oranı değerlerine bakıldığında;

6 mm bazalt fiberin zemine ağırlıkça %0,20 oranında katıldığı numunede maksimum taşıma gücü oranı %32,26 hesaplanmıştır. Bu da şahit numune ile karşılaştırıldığında 3,30 kat iyileşmeye karşılık gelmektedir.

12 mm bazalt fiberin zemine ağırlıkça %0,15 oranında katıldığı numunede maksimum taşıma gücü oranı %24,97 hesaplanmıştır. Bu da şahit numune ile karşılaştırıldığında 2,56 kat iyileşmeye karşılık gelmektedir.

24 mm bazalt fiberin ağırlıkça %0,15 oranında katıldığı numunede maksimum taşıma gücü oranı %26,12 hesaplanmıştır. Bu da şahit numune ile karşılaştırıldığında 2,67 kat iyileşmeye karşılık gelmektedir.

Su tutma özellikleri fazla olan kil zeminlerde, üzerlerine gelecek olan üst yapının özelliklerine ve mevcut durumdaki su muhtevalarına bağlı olarak şişme ve oturmalara bağlı problemlerin meydana gelmesi olasıdır. Bu tez çalışması sonucunda bazalt fiberin belli bir oranda zemine katılmasıyla zeminin şişme miktarının azaldığı ve dayanımının çok ciddi bir miktarda arttığı ortaya konmuştur. Bunun yanında bazalt fiber oranının optimum değerler üstüne çıkması durumunda şişme ve dayanım özelliklerinde iyileşme etkisinin olmadığı görülmektedir. Bunun sebebi olarak bazalt fiberin numune içinde boşluklar (drenler) oluşturması düşünülmekte olup bu sonuç literatürde cam fiber katkısı ile yapılan bir çalışma ile örtüşmektedir. Bazalt fiber oranının fazla olduğu durumlarda zemin içinde yığılmalar ve topaklanmalar oluşmakta ve homojen bir dağılımın sağlanması mümkün olmamaktadır.

Sonuç olarak, teknik açıdan üstünlükleri olan bazalt fiberin bunun yanında diğer sentetik katkı maddelerine oranla daha ucuz ve doğal bir volkanik malzeme olması ve çevreye de hiç bir zararının bulunmaması onu zemin iyileştirmesi konusunda alternatif bir malzeme yapmaktadır.

KAYNAKÇA

- Akbulut, S., Arasan, S. 2004. Atık liflerle güçlendirilmiş kil zeminlerin dinamik özelliklerinin araştırılması. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 397-406.
- Akıncı, A. 2009. Mechanical and morphological properties of basalt filled polymer matrix composites. Archives of Material Science and Engineering, 35(1): 29-32.
- Aksoy, İ.H., Sever, S., Haşal, M.E. 2006. Polistiren köpük daneleri çimento uçucu kül karışımının geoteknik özellikleri. İkinci Ulusal Geosentetikler Konferansı, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, sf. 69-74.
- Aral, M. 2006. Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı - bir optimum tasarım. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Arslan, M.E. 2017. Bazalt liflerin geleneksel betonların mekanik özellikleri ve kırılma enerjilerine etkilerinin incelenmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(3), 203-208.
- Aydoğmuş, T., Yıldız, A.A., Arslan, A.T., Örnek, M. 2006. Yüzeysel temeller altında geosentetik donatı etkisinin nümerik analizi. İkinci Ulusal Geosentetikler Konferansı, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, sf. 103-115.
- Ayraçma, B.B., Teymür, B. 2014. Fiber katkılı kumların geoteknik özellikleri. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 15. Ulusal Kongresi, Bildiriler Kitabı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 593-602.
- Bazalt donatı çubukları <http://basalt.today> Erişim Tarihi: 10.04.2019.
- Bazalt fiber nedir <http://basfiber.com> Erişim Tarihi: 10.04.2019.
- Chaohua, J., Ke, F., Fei, W., Da, C. 2014. Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fiber reinforced concrete. Materials and Design, 58: 187-193.
- Çalışkan, M., Akıncı, A., Yılmaz, Ş., Şen, U. 2011. Assignment of mechanical properties of basalt-LDPE composite materials using experimental and computer aided simulation methods. Scientific Research and Essay, 6(11): 2315-2324.

- Çetin, A.Y.. 2011. Yüksek plastisiteli kil zeminlerin alternatif malzemeler ile yüzeysel zemin stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Eskişar, T., Altun, S. 2015. Fiber donatılı ince taneli zeminlerin mekanik davranışlarının serbest basınç deneyleri ile incelenmesi. 6. Geoteknik Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Bildiri No: S045, Adana.
- Gümölcine, T., Bekem, A., Doğu, M., Gemici, Z., Ünal, A. 2013. İzofalik polyester matrisli sürekli e-camı ve bazalt fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine deneysel bir çalışma. Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 5(1): 104-115.
- Günaydın, O., Güçlüer, K. 2018. Bazalt lifi katkılı betonların mekanik özelliklerinin araştırılması. El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 5(2), 416-424.
- Işık, F., Akbulut, R.K., Zaimoğlu, Ş.A., Arasan, S. 2015. Kil zeminlerin iyileştirmesinde atık doğal liflerin kullanılabilirliği. 6. Geoteknik Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Bildiri No: S053, Adana.
- Kabay, N. 2014. Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber. Construction and Building Materials, 50: 95-101.
- Karakan, E., Eskişar, T., Altun, S.. 2016. Fiber donatılı gevşek ve orta sıkı kumların sıvılaşma davranışları. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onaltıncı Ulusal Kongresi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, sf. 249-256.
- Kenan, A., Özocak, A. 2018. Bazalt fiber katkısının siltli zeminlerin kayma direnci parametrelerine etkisi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Kumbhar, V.P. 2014. Basalt rock fibers-new construction material. Acta Engineering International, 2(1): 11-18.
- Kurt, G. 2006. Lif içeriği ve su/çimento oranının fibrobetonun mekanik davranışına etkileri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Laman, M., Yıldız, A., Örnek, M., Demir, A. 2009. Yumuşak kil zeminlerin geogrid donatı ile güçlendirilmesi. TÜBİTAK Araştırma Projesi: 106M496.
- Ndepete, C.P., Sert, S. 2017. Bazalt fiber katkısının silt zeminin drenajsız kayma direncine etkisi, Yedinci Ulusal Geosentetikler Konferansı, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, sf. 79-88.
- Ocakbaşı, P., Sert, S. 2017. Unconfined compression strength of a basalt fiber reinforced clayey soil. Icocee-Cappadocia 2017 Nevşehir, TURKEY, sf. 2400-2407.

- Özaydın, K. 2012. Zeminlerin İyileştirilmesi (Davetli Konuşmacı). Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 14. Ulusal Kongresi.
- Özdemir, T., Polat, G.E., Azdeniz, Ö., Boz, A., Sezer, A. 2016. Bazalt fiber ve kireç ile güçlendirilmiş kil zeminin dayanım özellikleri. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi. Atatürk Üniversitesi, Erzurum, 1025-1034.
- Parnas, R., Shaw, M., Liu, Q. 2007. Basalt fiber reinforced polymer composites. Report Prepared for The New England Transportation Consortium. NETCR63, Project No. 03-7.
- Priyadharshini, S., Ramakrishna, G. 2017. Recent Developments In Durability Of Natural Fibre Cement/Cementitious Composites-A Review. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences ©2006-2017 Asian Research Publishing Network (ARPN). ISSN 1819-6608, 6851-6868.
- Sateshkumar, S. K., Awoyera, P. O., Kandasamy, T., Nagaraj, S., Murugesan, P., Ponnusamy, B. 2018. Impact resistance of high strength chopped basalt fibre-reinforced concrete. *Revista de la Construcción. Journal of Construction*, 17(2), 240-249.
- Saygılı, A., Dayan, M., Kahyaoğlu, M.R. 2016. Kireçle zenginleştirilmiş kaolin kilinin dayanım özellikleri üzerinde silis dumanı ve sentetik liflerin etkisi. Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi, Atatürk Üniversitesi, Ankara. 933-940.
- Swink, M. 2002. Continuous filament basalt: a unique fiber capable of leadership in high temperature applications. Techtexil North America Symposium. Atlanta, GA, USA, 1-16.
- Şengezer, L. 2010. Granüler zeminlerde dinamik kompaksiyon uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Tang, M., Li, J. Q., Liu, H. L., Chen, N. 2012. Basalt fiber reinforced cement-based composite materials. In *Advanced Materials Research* (Vol. 374, pp. 1837-1842). Trans Tech Publications.
- Taramalı elektron mikroskobu sargem.sakarya.edu.tr Erişim Tarihi: 10.04.2019.
- TSE. 2000. TSE1500 İnşaat Mühendisliğinde Zemin Sınıflandırması, Ankara.
- TSE. 2006. TS1900-1 İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 1: Mekanik Özelliklerin Tayini, Ankara.
- TSE. 2006. TS1900-2 İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini, Ankara.

- Yılmaz, Y., Sevensan, Ü. 2010. Polipropilen fiber ve uçucu kül katkılı ankara kilinin bazı geoteknik özelliklerinin araştırılması. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi, İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul, 133-142.
- Yılmaz, Ş. 2015. Cam-Seramik Üretim Teknolojileri Ders Notu, Sakarya Üniversitesi FBE, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği EABD, Sakarya.
- Yılmaz, H.R., Eskişar, T., Aklık, P. 2006. Kaplamasız yollarda geosentetik kullanımının yararları üzerine çeşitli uygulamalar ile maliyet-fyada analizleri. İkinci Ulusal Geosentetikler Konferansı, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, sf. 191-200.
- Zaimoglu, Ş. 2010. Polipropilen fiber ve katkı malzemeleri ile iyileştirilmiş ince daneli zeminlerde serbest basınç dayanımının optimizasyonu. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi, İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul, 321-326.
- Zaimoglu, A.Ş. 2011. İnce daneli zeminlerde polipropilen fiber ve katkı malzemelerinin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkileri. 4. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.

ÖZGEÇMİŞ

Muharrem KÜÇÜKOSMANOĞLU, 22.06.1979 tarihinde Giresun'da doğdu. İlköğretim ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 2002 yılında Adapazarı Meslek Yüksek Okulundan, 2007 yılında Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2007 yılından bu yana Adapazarı Belediyesinde inşaat mühendisi olarak görev yapmaktadır. Evli ve iki çocuk babasıdır.