

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BAZALT FİBER KATKISININ SİLTİLİ ZEMİNLERDE
KAYMA DİRENCİNE ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

Cyrille Prosper NDEPETE

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

Aralık 2017

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BAZALT FİBER KATKISININ SİTLİ ZEMİNLERDE
KAYMA DİRENCİNE ETKİSİ

DOKTORA TEZİ

Cyrille Prosper NDEPETE

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK

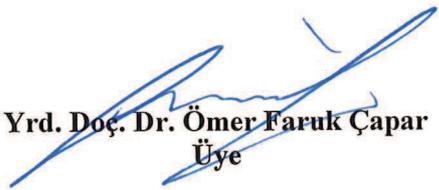
Bu tez ⁰⁷... / 12 /2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliğiyle kabul edilmiştir.


Yrd. Doç. Dr. Sedat Sert
Jüri Başkanı


Doç. Dr. Ertan Bol
Üye


Doç. Dr. Aşkın Özocak
Üye


Doç. Dr. Ahmet Beycioğlu
Üye


Yrd. Doç. Dr. Ömer Faruk Çapar
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.

Cyrille Prosper NDEPETE

07.12.2017



TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim süresince değerli bilgi ve laboratuvar deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın her aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Sedat SERT'e teşekkür ederim.

Bazalt fiber malzemesinin Türkiye'de geoteknik alanında kullanımını öneren, çalışmamın bu alanda öncülerden birisi olmasını sağlayan ve malzeme temininde yardımlarını esirgemeyen Düzce Üniversitesi öğretim üyesi Doç. Dr. Ahmet BEYÇİOĞLU'na, çalışmam boyunca fikirlerini esirgemeyen Sakarya Üniversitesi öğretim üyeleri Prof. Dr. Akın AKINCI'ya, Doç. Dr. Ertan BOL'a ve Doç. Dr. Aşkın ÖZOCAK'a şükranlarımı bildiririm. Laboratuvar çalışmalarında yardımcı olan Teknikerler Recep EYÜPLER ve Sebahattin İŞ'e ve ayrıca çalışmalarımda yanımda olan arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında yanımda olan, iyi bir birey olarak yetişmem için gayret eden, benden sevgi ve desteklerini esirgemeyen sevgili eşim, çocuklarım ve tüm aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim. Doktora çalışmamı bitirdiğimi göremeyen, asla unutmayacağım, sevgili babam Paul NDEPETE'nin manevi desteğini her zaman kalbimde hissettiğimi belirtmek isterim.

Doktora çalışmamı destekleyen Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2017-50-02-009) ve ayrıca bazalt fiber malzemesini bedelsiz olarak tarafımıza sağlayan Spinteks Tekstil İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ne de teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLOLAR LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ VE AMAÇ	1
---------------------	---

BÖLÜM 2.

KATKI MALZEMELERİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRME VE FİBER KATKISI	4
2.1. Fiber Türleri	6
2.2. Doğal Fiberlere Örnekler	7
2.2.1. Akwara	7
2.2.2. Bambu fiberleri	7
2.2.3. Hindistan cevizi fiberleri	7
2.2.4. Keten fiberleri	8
2.2.5. Jüt fiberleri	8
2.2.6. Sisal fiberleri	8
2.2.7. Palm fiberleri	8
2.2.8. Şeker kamışı posası	8
2.2.9. Ahşap (selüloz) fiberler	9
2.3. Yapay Fiberler	9

2.3.1. Cam fiberleri	9
2.3.2. Polimer fiberler	9
2.4. Katkı Malzemeleri ve Fiberler ile Zemin İyileştirme Çalışmaları	10
2.4.1. Katkı malzemeleri ile zemin iyileştirme örnekleri	10
2.4.2. Doğal fiber katkılı zemin iyileştirme çalışmalarına örnekler	12
2.4.3. Yapay fiber katkılı zemin iyileştirme çalışmalarına örnekler	14

BÖLÜM 3.

BAZALT VE BAZALT FİBERLER	18
3.1. Bazalt	18
3.2. Türkiye Bazaltları	18
3.3. Bazalt Fiber	20
3.3.1. Bazalt fiberlerin üretimi	20
3.4. Bazalt Fiberlerin Özellikleri	21
3.4.1. Mekanik mukavemet	21
3.4.2. Kimyasal direnç	21
3.4.3. Korozyon ve mantar direnci	22
3.4.4. Ekolojik yapı	22
3.5. Bazalt Lif Ürünleri	23
3.6. Bazalt Fiberin Betonda Kullanımı	24
3.7. Bazalt Fiber Katkısı ile Zemin İyileştirmesi Örnekleri	27

BÖLÜM 4.

MALZEMELER VE METOT	28
4.1. Malzemeler	28
4.1.1. Silt zemin	28
4.1.2. Bazalt fiber	28
4.2. Metot	31
4.2.1. Fiziksel deneyler	32
4.2.1.1. Kıvam limiti deneyleri	32
4.2.1.2. Özgül ağırlık deneyi	35

4.2.1.3. Elek analizi, hidrometre ve pipet deneyleri	36
4.3. Silt Zeminin Kimyasal Özellikleri	38
4.3.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	38
4.4. Doymun Olmayan Numunelerin Kompaksiyon ile Hazırlanması	39
4.4.1. Kompaksiyon deneyi hesaplamaları	41
4.5. Doymun Numunelerin Konsolide Edilerek Hazırlanması	42
4.6. Konsolidasyonsuz Denajsız Üç Eksenli Hücre Kesme Deneyleri (UU)	44
4.6.1. Üç eksenli hücre kesme deneyi (UU) hesaplamaları	47
BÖLÜM 5.	
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	49
5.1. Siltin ve Bazalt Fiberin Mineral ve Mikro Yapı Özellikleri	49
5.2. Silt - Fiber Karışımlarının Mikro Yapı Özellikleri	51
5.3. UU Deneyinde Makroskopik Davranış	52
5.4. Üç Eksenli Hücre Kesme Deneyi (UU) Sonuç Özeti	55
5.4.1. Doymun olmayan ve doymun numunelerin dayanımlarında bazalt fiber katkısı ile artış oranları.....	58
5.4.2. Doymun olmayan ve doymun numunelerde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi	59
5.5. Doymun Olmayan ve Doymun Numunelerde Fiber Oranı Etkisi	65
5.5.1. Doymun olmayan numunelerde fiber oranı etkisi	65
5.5.2. Doymun numunelerde fiber oranı etkisi	66
5.6. Doymun Olmayan ve Doymun Numunelerde Fiber Boyu Etkisi	71
5.6.1. Doymun olmayan numunelerde fiber boyu etkisi	71
5.6.2. Doymun numunelerde fiber boyu etkisi	75
BÖLÜM 6.	
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	79
KAYNAKLAR	83
ÖZGEÇMİŞ	89

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

γ_w	: Suyun birim hacim ağırlığı
G_s	: Özgül ağırlık
A_0	: Numune ilk alanı
A	: Düzeltilmiş alan
ε	: Düşey birim boy değişimi
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
H	: Numune boyu
I_p	: Plastisite İndisi
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	: Doygunluk derecesi
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
UCS	: Serbest basma dayanımı (Unconfined compressive strength)
USCS	: Birleştirilmiş Sınıflandırma Sist. (Unified Soil Classification Syst.)
UU	: Konsolidasyonsuz drenajsız (Unconsolidated undrained)
UUS	: Konsolidasyonsuz drenajsız deneyde dayanım (Unconsolidated Undrained Strength)
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
γ_{kmak}	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık
ϕ	: Kayma direnci açısı
σ	: Toplam normal gerilme
τ_{max}	: Kayma direnci

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Türkiye bazalt haritası	20
Şekil 3.2. Kıyılmış bazalt fiberler	23
Şekil 3.3. Bazalt ip, lif	23
Şekil 3.4. Bazalt çubuklar	24
Şekil 4.1. Çalışma alanı ve numune alımı	29
Şekil 4.2. Numunenin depo alanından laboratuvara taşınması ve 2.36 mm açıklıklı elekten elenmesi	29
Şekil 4.3. Elenen siltin serilip kurutulması	29
Şekil 4.4. Bazalt fiberler (a) torbalanmış bazalt fiberler (b, c) değişik uzunluklardaki bazalt fiberler	30
Şekil 4.5. Casagrande ve koni yöntemi ile likit limitin bulunması, (a) zemini su ile karıştırma, (b, c) Casagrande deneyinde cihazın içine zemin konulması, (d) Casagrande deneyi sonrası numune görünümü, (e) koni deneyi, (f) iki batma sonrası siltli zemin görünümü, (g) su içeriklerinin belirlenmesi için alınan örnekler	33
Şekil 4.6. Plastik limit deneyi, (a) numune, (b) yuvarlama işlemi, (c) 3 mm çapında çatlayan numune	34
Şekil 4.7. Likit limit akma doğrusu	35
Şekil 4.8. Siltin TS 1500/2000 plastisite kartındaki yeri	35
Şekil 4.9. Özgül ağırlık deneyleri aşaması.....	36
Şekil 4.10. Dane çapı dağılımının bulunması, (a) hidrometre deneyi, (b) pipet deneyi, (c) elek analizi deneyi	37
Şekil 4.11. Silt zeminin dane dağılım eğrisi	37
Şekil 4.12. Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarındaki SEM	38
Şekil 4.13. Silt, (a) kuru numune, (b) su ilavesi, (c, d) fiber ilavesi, (e) poşetleme .	40

Şekil 4.14. Kompaksiyon uygulaması	41
Şekil 4.15. Deney numunesinin bulamaç haline getirilmesi, (a, b) doğal zemin, (c) fiberli zemin, (d) bulamaç içindeki hava kabarcıklarının çıkarılması, (e) desikatörden çıkmış zemin	43
Şekil 4.16. Numune hazırlama ve yükleme	44
Şekil 4.17. UU deney sistemi ekipmanları	45
Şekil 4.18. Üç eksenli hücre kesme deneyi aşamaları, (a, b) doygun ve doygun olmayan numunelerin büyük kriko ile küçük tüplere alınması, (c, d, e) numunelerin küçük tüplerden çıkarılması, (f) numunelerin tartılması, (g, h) numunelerin boyu ve çapının ölçülmesi, (i) lastik membran yerleştirilmesi, (j) deformasyon ölçüm mekanizmasının oturtulması, (k) çevre basıncının ayarlanması, (l) okuma	46
Şekil 4.19. Deney numunesi, (a) deneyden önce, (b) deneyden sonra	47
Şekil 5.1. SEM analizi: silt zemin mikro yapısı (a) X700, (b) X5000, (c) X1000, (d) X5000	49
Şekil 5.2. SEM analizi: bazalt fiber mikro yapısı (a) X100, (b) X5000	50
Şekil 5.3. Fiber ve zemin kolon-ağ modeli, (a) bazalt fiber ve partiküller, (b) lifler ve partiküller arasındaki etkileşim (Gao vd., 2015)	52
Şekil 5.4. Fiber-silt karışımının SEM mikrografisi.....	53
Şekil 5.5. UU deneyleri sonrası numuneler, (a) doygun olmayan doğal zemin, (b) doygun olmayan fiberli zemin, (c) doygun doğal zemin, (d) doygun fiberli zemin	54
Şekil 5.6. UU deneyleri sonrası bütün zemin örnekleri	54
Şekil 5.7. Doygun olmayan (a) ve doygun numunelerde (b) kayma direnci	59
Şekil 5.8. Doygun olmayan numunelerde gerilme - şekil değiştirme ilişkisi (su: 400 ml, $\sigma_3=400$ kPa)	63
Şekil 5.9. Doygun numunelerde gerilme - şekil değiştirme ilişkisi ($\sigma_{kons}=100$ kPa, $\sigma_3=400$ kPa)	64
Şekil 5.10. Doygun olmayan zeminlerde (su: 100 ml) dayanım - fiber oranı ilişkisi	66
Şekil 5.11. Doygun olmayan zeminlerde (su: 200 ml) dayanım - fiber oranı ilişkisi	67
Şekil 5.12. Doygun olmayan zeminlerde (su: 300 ml) dayanım - fiber oranı ilişkisi	67
Şekil 5.13. Doygun olmayan zeminlerde (su: 400 ml) dayanım - fiber oranı ilişkisi	68

Şekil 5.14. Doygun olmayan zeminlerde (su: 500 ml) dayanım - fiber oranı ilişkisi	68
Şekil 5.15. Doygun zeminlerde ($\sigma_{k\text{ons}} = 100$ kPa) dayanım - fiber oranı ilişkisi	69
Şekil 5.16. Doygun zeminlerde ($\sigma_{k\text{ons}} = 200$ kPa) dayanım - fiber oranı ilişkisi	69
Şekil 5.17. Doygun zeminlerde ($\sigma_{k\text{ons}} = 300$ kPa) dayanım - fiber oranı ilişkisi	70
Şekil 5.18. %1 fiber katkılı doygun olmayan zeminde dayanım - fiber boyu ilişkisi	72
Şekil 5.19. %1,5 fiber katkılı doygun olmayan zeminde dayanım - fiber boyu ilişkisi	73
Şekil 5.20. %2 fiber katkılı doygun olmayan zeminde dayanım - fiber boyu ilişkisi	74
Şekil 5.21. Doygun zeminlerde ($\sigma_{k\text{ons}} = 100$ kPa) dayanım – fiber boyu ilişkisi	76
Şekil 5.22. Doygun zeminlerde ($\sigma_{k\text{ons}} = 200$ kPa) dayanım – fiber boyu ilişkisi	77
Şekil 5.23. Doygun zeminlerde ($\sigma_{k\text{ons}} = 300$ kPa) dayanım – fiber boyu ilişkisi	78

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Fiber çeşitleri	6
Tablo 2.2. Değişik fiber çeşitlerine ait tipik özellikler	6
Tablo 3.1. Bazaltların kimyasal bileşimleri	19
Tablo 3.2. Türkiye bazaltlarının kimyasal bileşenleri (% ağırlıkça)	19
Tablo 3.3. Bazalt fiberlerin diğer fiberlerle karşılaştırılması	22
Tablo 4.1. Silt zemin fiziksel özellikleri	30
Tablo 4.2. Bazalt fiberin fiziksel ve mekanik özellikleri	30
Tablo 4.3. Hazırlanan karışımlarda silt ve fiber ağırlığı, fiber boy ve oranları	32
Tablo 5.1. Silt zemini oluşturan mineraller (SEM)	50
Tablo 5.2. Bazalt fiberi oluşturan mineraller (SEM)	50
Tablo 5.3. Doygun olmayan numunelerin dayanımlarında bazalt fiber katkısı ile artış oranları	55
Tablo 5.4. Doygun numunelerin dayanımlarında bazalt fiber katkısı ile artış oranları	57
Tablo 5.5. Doygun olmayan numunelerde maksimum deviatör gerilme ve kırılmada boy değişimi değerleri	60
Tablo 5.6. Doygun numunelerde maksimum deviatör gerilme ve kırılmada boy değişimi değerleri	62

ÖZET

Anahtar sözcükler: Zemin iyileştirmesi, bazalt fiber, drenajsız kayma direnci, doymun olmayan ve doymun silt.

Zemin ve betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek için lif katkı malzemelerinin kullanımı artan bir şekilde devam etmektedir. Günümüzde büyüyen çevre problemleriyle birlikte, özellikle zemin iyileştirmesi için kullanılacak ek gerecin/malzemenin çevre dostu olma özelliği varsa değerinin de artacağı açıktır. Çelik ve sentetik fiberler beton ve zemin iyileştirmesi için, doğal lifler de çoğunlukla zemin iyileştirmesi için kullanılan katkı malzemelerine örnek olarak verilebilirler. Doğal kökenli fiberlere örnek olarak gösterilebilecek bazalt fiberlerin beton dayanımını artırmaya yönelik yaygın olarak kullanıldığı bilirse de zeminlerin iyileştirilmesinde kullanımı ile ilgili çalışmalar literatürde yok denecek kadar azdır.

Buradan hareketle yürütülen bu deneysel çalışmada, bazalt fiber katkısının doymun olmayan ve doymun olan siltli zemin örnekleri üzerinde kayma direncini artırıcı etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan silt Adapazarı'nda yüzeyin 3-4 m altından alınmıştır. İki kısımdan oluşan deneysel çalışmanın ilk aşamasında öncelikle doğal zemin 5 farklı su muhtevasında sıkıştırılarak doymun olmayan zemin örnekleri oluşturulmuştur. Çalışmanın ikinci aşamasında ise doymun zemin örnekleri, 100 kPa-200 kPa ve 300 kPa düşey gerilme altında konsolidasyona tabi tutularak elde edilmiştir. Birinci aşamada kompaksiyondan, ikinci aşamada ise konsolidasyon sürecinden sonra elde edilen her bir numuneden 4'er adet silindirik numune alınarak farklı çevre basınçlarında konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyleri (UU) yapılmıştır. Çalışmanın her iki safhasında doğal numuneler üzerinde deneyler bitirildikten sonra aynı işlemler 6 mm - 12 mm ve 24 mm boylarında bazalt fiberlerin, doğal zemine ağırlıkça %1 - %1,5 ve %2 oranında karıştırılarak elde edilmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Bunun yanında makroskopik görüntüler ve mikroyapı arasında bir korelasyon oluşturmak için, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri doğal zemin örnekleri ve bazalt fiberleri ile güçlendirilmiş örnekler üzerinde yapılmıştır.

Gerçekleştirilen 320 adet UU deney sonucuna göre, silt zemine bazalt fiber eklenmesiyle doymunluk derecesi farketmeksizin tüm numunelerde drenajsız kayma direncinin arttığı görülmüştür. Fiber uzunluğunun artmasıyla direnç artışı sürekli yükselme eğiliminde iken, fiber oranının ağırlıkça %1,5 seçildiği durumda direnç artışı en yüksek bulunmuş, fiber oranının %2'ye yükseltilmesi durumunda direnç artışı daha düşük olmuştur. Sonuç olarak bazalt fiberin kullanılageldiği beton yanında zemin özelliklerini iyileştirmede de alternatif olabileceği ortaya konmuştur.

IMPROVEMENT OF THE UNDRAINED SHEAR STRENGTH OF SILTY SOIL BY THE ADDITION OF BASALT FIBERS

SUMMARY

Keywords: Soil improvement, basalt fiber, undrained shear strength, unsaturated and saturated silty soil.

In order to improve the mechanical properties of soils and concrete, an increasing number of different fibers are used. Today, with the environmental problems, the materials used to improve soil and concrete must be environmentally tolerated and ecological. Steels, synthetic fibers and natural fibers are usually used in the field of construction while natural fibers are mostly used in soil improvement. Although basalt originated fibers have been used for concrete for many years, it is not easy to find a source in literature concerning the use of basalt fibers for soil improvement.

In this experimental work, unsaturated and saturated samples of soil mixed with basalt fibers were prepared and undrained shear strength of each sample were tested. The sample used in this study was taken between 3 to 4 m deep from Adapazari city. In the first part of the study, the natural soil samples were compacted at five different water contents. The soil samples were consolidated under vertical stress of 100 kPa - 200 kPa and 300 kPa in the second part of experimental work. After compaction and consolidation, 4 cylindrical samples were taken and the unconsolidated undrained triaxial (UU) tests were performed. 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 1% - 1,5% and 2% depending on the dry weight of the soil.

In order to make a correlation between the microscopic images and the microstructure, the SEM analysis were carried out on the naturel soil samples and those improved with the basalt fibers.

The results of 320 UU tests show that the addition of the basalt fibers improved the shear strength of all of the samples regardless of the degree of saturation. As the length of the fibers used increases, the improvement of the sample becomes better. The best shear strength is obtained for the fiber of 24 mm and 1,5% respectively. When the percentage of basalt fiber reaches 2%, the resistance decreases. Compared to the results obtained, basalt fibers can be used as an alternative material to reinforce soil in addition to concrete.

BÖLÜM 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Yirminci yüzyılda ekonomik ve endüstriyel gelişme dönemiyle başlayan şehirleşme ve hızlı nüfus artışı günümüzde de sürmekte, sonuç olarak da stratejik önemi olan birçok projenin (endüstriyel binalar, toprak işleri, kara ve demiryolları, hidrolik yapılar) kötü zemin koşullarına sahip alanlarda gerçekleştirilmesi gerekebilmektedir.

İlk çağlardan bu yana yeni açılan yerleşim yerlerinde gerek vahşi hayvanlardan korunmak, gerekse suya doygun yumuşak/gevşek zeminlerden doğabilecek problemleri aşmak amacıyla “ahşap çakma kazıklar” özelinde derin temeller benimsenmiştir. Günümüzde artan yapı yükseklikleri derin temellerin uygulanması için geçmişte olduğundan farklı olarak ileri teknoloji gerektirmekte, buna bağlı olarak da maliyetler aşırı yükselebilmektedir. Bu maliyetlerin azaltılması için zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik olarak birçok teknik kullanılmaktadır. Bunun yanında geoteknik mühendisliğinin diğer uygulama alanlarında da benzer olarak taşıma gücünün düşük, oturmaların ve geçirimsizliğin fazla olması vs. gibi çeşitli zemin sorunlarıyla karşılaşılabilen, zeminlerin iyileştirilmeleri için teknik ve ekonomik değerlendirmeler yapılarak farklı yöntemler kullanılmaktadır. Dhouib vd. (2004), iyileştirme yöntemlerinin doğal zemin dane boyutu ve dağılımı özelliklerine bağlı olarak değişebileceğini belirtmiş, doğal/yapay liflerin ve kimyasalların zemine ilave edilmesini örnek olarak vermiştir.

Günümüzde zemin iyileştirilmesinde kullanılan geleneksel çimento ve kireç gibi katkı maddelerine alternatif olarak doğal ve yapay fiberlerin kullanımı üzerine çalışmalar sürekli artmaktadır. İyileştirme için bambudan şeker kamışına, Hindistan cevizi lifinden çeşitli bitki liflerine değişen doğal lifler kullanılırken, polipropilen (PP), polyester (PET), polietilen (PE), cam, naylon, çelik lif gibi malzemeler de

yapay lifler olarak kullanılmaktadır (Hejazi vd., 2012). Kimyasal katkı malzemeleri veya fiber katılarak zemin stabilizasyonu ulaşım yapılarına yönelik olarak yüzeyden yapılabileceği gibi, son birkaç on yılda kullanımı artan derin karıştırma yöntemleri ile de bina temellerinden dolgulara, hızlı trenlerin titreşimlerinin azaltılmasından sıvılaşmanın önlenmesine kadar bir çok alanda uygulanmaktadır (Correia vd., 2015).

İnşaat mühendisliğinde birçok amaçla kullanılan bazalt, volkanik bir kaya çeşidi olup doğal bir malzemedir. Karayolu mühendisliğinde kırılmış kaya olarak veya yapılarda dış cephe ve zemin kaplama malzemesi olarak kullanılabilir. Erime ve eğirme işleminden sonra doğal bazalttan elde edilen ve doğal fiberlere örnek olarak verilebilecek bazalt fiberler, cam, karbon ve aramid liflere alternatif olarak uzun yıllardır betonun özellikle çekme, eğilme ve çarpma dayanımları gibi mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, ayrıca gevrek kırılma özelliğinin kısmen giderilebilmesi amacıyla kullanılmaktadır (Ross, 2006; Kabay, 2014).

Karbon ve aramid hem mukavemet özellikleri hem de ekonomik açıdan cam fiberlerden daha fazla tercih edilmektedir. Son yıllarda cam fiberlere alternatif olarak yer bulan bazalt fiberler de çevre açısından güvenli, toksik olmayan, yüksek stabilite ve yalıtım karakteristiklerine sahiptir (Gümölcine vd., 2013; Kabay, 2014). Bahsedilen özelliklerin yanı sıra bazalt fiber cam fibere göre daha iyi gerilme mukavemetine sahiptir (High vd., 2015). Ayrıca bazalt fiberler karbon fiberlere göre zehirli gazlara, kimyasal etkenlere, darbe yüküne ve ateşe karşı daha iyi direnç gösterirler. Bazalt lifleri durabilite, sıcaklığa karşı direnç ve dayanım yönünden güçlü kılın özellik volkanik kayalardan elde edilmesidir. Bazalt lifler, bazalt kayacının erime işlemlerinden geçirilip ince partiküller halinde ayrılmasıyla elde edilir. Bu işlemler gerçekleştirilirken lif üretiminde başka herhangi bir katkı malzemesi kullanılmamaktadır.

Yukarıda sayılan üstün özelliklerine rağmen literatürde bazalt fiberlerin zemin iyileştirmesinde kullanımına yönelik çalışmaların sayısının oldukça az olduğu

görülmektedir. Buradan hareketle bu doktora tez çalışmasında bazalt fiber katkısının siltli zeminler üzerinde kayma direncini artırıcı etkisinin ortaya konması amaçlanmıştır. Deneysel çalışmada tüm deneyler Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarı'nda yürütülmüştür.

Çalışmada, Adapazarı zeminlerinden elde edilen silt numune öncelikle doğal halde farklı su muhtevalarında sıkıştırılmış ve elde edilen silindirik numuneler üzerinde konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyleri (UU) yapılmıştır. Daha sonrasında aynı işlemler 6 - 12 - 24 mm boylarındaki bazalt fiberin, %1 - %1,5 ve %2 oranında siltli zemine karıştırılması ve sıkıştırılması sonrasında elde edilen silindirik numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise konsolide edilerek hazırlanmış doğal ve bazalt fiber katkılı doymun numunelerde UU deneyleri tekrarlanmıştır. Makroskopik görüntüler ve mikro yapı arasında bir korelasyon oluşturmak için de, doğal zemin örnekleri ve bazalt fiberleri ile iyileştirilmiş örnekler üzerinde Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi gerçekleştirmiştir.

BÖLÜM 2. KATKI MALZEMELERİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRME VE FİBER KATKISI

Geoteknikte karşılaşılan problemlerin çoğu yumuşak/gevşek doygun zeminlerde meydana gelmektedir. Nehirlerin suya döküldüğü veya taşkınların etkili olduğu bölgelerde, ayrıca körfezlerin çevresi boyunca ve bataklıklarda karşılaşılabilen bu tip zeminler, taşıma gücü, oturma, sıvılaşma ve şişme problemi gösterebilmektedir. Organik madde içeriğinin artması problemleri daha da kötüleştirmektedir (Coduto, 1998).

Zeminlerin üzerlerine/içlerine inşa edilecek yapılar için geoteknik açıdan yeterli özelliklere sahip olmamaları durumlarında zemin iyileştirmesi ihtiyacı doğabilmektedir. Genel olarak zeminlerde iyileştirmeye statik durumda taşıma gücü ve oturma problemleri, deprem durumunda da sıvılaşma problemi nedeniyle ihtiyaç duyulduğu söylenebilir. Özaydın (2012), zemin iyileştirmesini, yukarıda belirtilen kötü özellikleri taşıyan zeminlerin istenen özelliklerinin, hedeflenen bir mühendislik uygulamasına yönelik olarak, farklı fiziksel, kimyasal veya biyolojik yöntemler kullanılarak iyileştirilmesi olarak tarif etmektedir. Önalp ve Sert (2016), iyileştirmenin genel durumu ifade ettiğini, zemin özelliklerinin amaca yönelik olarak değiştirilmesinin stabilizasyon olarak isimlendirildiğini belirtmişlerdir.

Özaydın (2012), zemin iyileştirmesinde başlıca hedefleri taşıma gücünü artırmak, yapı yükü altında oturmaları azaltmak, gerilmeler etkisinde doğacak şekil değiştirmeleri kabul edilebilir değerlere indirmek, şişme-büzülme potansiyelini azaltmak, erozyona karşı direnci artırmak, geçirimsizliği azaltmak, artık su basınçları oluşumunu ve sızıntıları kontrol etmek, depremler ve titreşim etkisinde sıvılaşma ve/veya yumuşama potansiyelini azaltmak, yapı temelleri altındaki doğal zeminler ve/veya dolgularda homojenliği sağlamak, yüzeysel bozulmaları önlemek ve çevresel

etkiler (donma/çözülme, ıslanma/kuruma) sonucunda olumsuz fiziksel ve kimyasal değişimleri önlemek şeklinde özetlemiştir.

Hausmann (1990), iyileştirme ve stabilizasyon yöntemlerini mekanik, hidrolik, fiziksel-kimyasal, katkılı-yapısal destekli ve kitleyi kısıtlayarak özellikleri iyileştiren yöntemler olarak sınıflandırmıştır.

Mekanik yöntemlerde kısa süreyle uygulanan mekanik kuvvetler zemin yoğunluğunu artırmaktadır. Patlatma, titreşimli veya darbeli silindir/tablalar ile sıkıştırma ve derinde titreşimle sıkıştırma mekanik yöntemlere örnek verilebilir (Yıldırım, 2009). Hidrolik yöntemlere örnek olarak açılan kanallarla boşluk suyu basıncının düşürülmesi ve dolayısıyla kayma direncinin artırılması, iri daneli zeminlerde açılan kuyular/pompalama ile ve ince daneli zeminlerde düşey drenler yardımı ile yeraltı su seviyesinin düşürülmesi, ayrıca elektriksel yüklerle boşluk suyunun uzaklaştırılması verilebilir (Yıldırım, 2009).

Fiziksel ve kimyasal iyileştirme, katkı malzemelerinin zemine fiziksel olarak karıştırılıp, karışımın derinlerden yüzeye doğru kolonlar teşkil etmesi yolu (derin karıştırma) ile yapılabilir. Katkılar, birbirleriyle veya zeminle reaksiyona giren çimento, kireç veya kimyasal maddeler olabilir. Katkı malzemesinin daneler arası boşluklara basınçla yollanması (enjeksiyon), dondurma ve ısıtma ile iyileştirme, jet-grout yöntemi bu gruba örnek olarak verilebilir (Yıldırım, 2009).

Geoteknik mühendisliğinde, taşıma gücü ve oturma gibi problemlere çözüm olarak geosentetik donatıların kullanımı artan bir ilgi görmektedir. İri daneli malzemenin dolgu gereci olarak kullanıldığı donatılı zemin yapıları karayolları gibi mühendislik uygulamalarında kolay uygulanabilir ve ekonomik olması nedeniyle yaygın kullanım bulmaktadır (Shin ve Das, 1998).

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

2.1. Fiber Türleri

Fiberler, doğal kaynaklardan elde edilenler ya da insanlar tarafından üretilenler olmak üzere ikiye ayrılabilirler. Aral (2006), doğal lifleri bitkisel, hayvansal ve madensel olmak üzere üçe ayırmıştır. Tablo 2.1.'de doğal ve yapay fiberlere örnekler sunulmaktadır. Literatürde bunlar dışında tavuk tüyü/teleğine varabilen çeşitlilikte çalışmalar bulunmaktadır. Doğal veya yapay bazı fiberlerin özellikleri de Tablo 2.2.'de örnek olarak verilmektedir.

Tablo 2.1. Fiber çeşitleri (Aral, 2006)

Doğal Lifler			Yapay Lifler
Bitkisel Lifler	Hayvansal Lifler	Madensel Lifler	
Akwara	Yün	Asbest	Cam Lifleri
Bambu	İpek	Bazalt	Kevlar
Hindistan Cevizi Kabuğu	Kıl	Metal Lifler	Akrilik
Keten, Kenevir	-	Karbon	Aramid
Jüt	-	-	Naylon
Sisal	-	-	Polyester
Palm	-	-	Polietilen
Şeker Kamışı Posası	-	-	Polipropilen
Ahşap (Selüloz)	-	-	Poliüretan

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

Lif Türü	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	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 fiberler çok eski zamanlardan beri gevrek malzemelerin donatılabilmesi için kullanılmaktadırlar. Samanın güneş ışığında pişirilmiş tuğla yapımında ve at kılının duvar harcı ve sıva yapımında kullanımı buna örnek olarak verilebilir. Doğal fiberlerin çoğu bitkilerin saplarından el ile çıkarılabilirler (Aral, 2006). Gelişen teknoloji ile doğal fiberler günümüzde birçok bitkiden kolay ve ekonomik bir biçimde üretilmektedir. Örneğin; çimentolu kompozitlerde kullanılan jüt ve bambu fiberlerinin üretimi çok az enerji gerektirmektedir.

2.2.1. Akwara

Genel olarak Afrika bölgesinde ve özellikle Nijerya'da bol miktarda bulunan bir bitki sapından elde edilen doğal fiberdir. Bu fiberler alkali ortamlarda, nemli ve kuru ortamlarda sürekliliklerini kaybetmezler. Sakıncaları ise çok düşük elastisite modüllerine sahip olmalarıdır (Uzomaka, 1976).

2.2.2. Bambu fiberleri

Tropikal ve astropikal bölgelerde yetişen bambular 15 m yüksekliğe kadar büyüyebilirler. Gövdelerinin içi boş olup çapları 1 cm'den 10 cm'ye kadar çeşitlilik gösterir. Bambu fiberleri çekmeye karşı dayanıklıdır. Ancak düşük elastisite modülüne sahiptirler (ACI, 2002).

2.2.3. Hindistan cevizi fiberleri

Tropikal bölgelerde yetişirler. Olgunlaşmamış Hindistan cevizinin dışında sert fiberli bir kabuk bulunur, bu kabuğu saran fiberler suya batırılarak ya da mekanik işlemlerle çıkartılır. Düşük elastisite modülüne sahip olan Hindistan cevizi fiberleri sıcaklık ve nem değişikliklerine hassastırlar (ACI, 2002).

2.2.4. Keten fiberleri

Yüksek çekme dayanımına sahip olan keten fiberlerinin elastisite modülleri de yüksektir.

2.2.5. Jüt fiberleri

Anavatani Doğu Hindistan olan jüt bitkisinden elde edilir. Bu bitkilerin uzunlukları 2,4 m civarında ve çapları ise 25 mm'den küçük olur. Bitki gövdesi suya batırıldığında içine su alır ve fiberleri gevşer. Bu fiberler el ile ayrılır ve kurutulur. Son yıllarda bu işlem için mekanik aletler de geliştirilmiştir. Çekme gerilmesine dayanıklı olan jüt fiberleri, geleneksel olarak halat, çuval, çanta ve giysi yapımında kullanılır (Aral, 2006).

2.2.6. Sisal fiberleri

Sisal (Aga ve Sisalana) bitkisinin yapraklarından elde edilir. İçinde, hemiselüloz, lignin ve pektin elemanlar vardır. Güçlüdürler, ancak alkali ortamda sürekli dayanıma sahip değildirler.

2.2.7. Palm fiberleri

Tropikal bölgelerde yetişirler. Hindistan cevizi lifleri gibi düşük elastisite modülüne sahiptirler, sıcaklık ve nem değişikliklerine hassastırlar.

2.2.8. Şeker kamışı posası

Şeker kamışının suyu sıkıldıktan sonra kalan posası %50 civarında fiber içermektedir. Fiziksel özellikleri ise şeker kamışının çeşidine, olgunluğuna ve bitkinin değirmende çekilme verimliliğine göre değişir (ACI, 2002).

2.2.9. Ahşap (selüloz) fiberler

Ahşap lifler kağıt hamuru şeklinde elde edilir. Özellikle asbest fiberlerinin yerlerini alırlar. Bol bulunması, yüksek çekme dayanımı ve elastisite modülü, elde edilme kolaylığı yaygınlaşma nedenlerindedir. En büyük sakıncası alkali ortamda parçalanabilir olmasıdır. Son yıllardaki gelişmelerle, fiberlerin parçalanabilir olması kontrol edebilmektedir. Lignin olmayan selüloz fiberlerinin çekme dayanımı 200 MPa'dır. Lignin içeren selüloz fiberde ise çekme dayanımı 500 MPa'a yükselebilmektedir (ACI, 2002).

2.3. Yapay Fiberler

Son zamanlarda inşaat mühendisliği sektöründe birçok yapay fiber türü kullanılmaya başlamıştır.

2.3.1. Cam fiberleri

Cam fiberler ilk kullanıldıklarında (A ve E tipi cam fiberler) alkali özellikteki betonun bu fiberleri zamanla çözdüğü ve uzun vadede dayanımın düştüğü görülmüştür. Zamanla süren araştırmalarla bu dezavantajı ortadan kaldıran A ve R tipi cam fiberler üretilmiştir (Majumdar, 1975).

2.3.2. Polimer fiberler

Tekstil ve petrokimya sektörlerinde yapılan araştırmalar ve elde edilen gelişmeler sonucu sentetik polimer fiberleri üretilmiştir. Akrilik, aramid, naylon, polyester (PT), polietilen (PE) ve polipropilen (PP) başlıca polimer fiber çeşitleridir. Hepsinin de çok yüksek çekme dayanımları vardır, ancak aramid dışında kalanların elastisite modülleri düşüktür (ACI, 2002).

2.4. Katkı Malzemeleri ve Fiberler ile Zemin İyileştirme Çalışmaları

2.4.1. Katkı malzemeleri ile zemin iyileştirme örnekleri

Cömert ve Ural (2015) yaptıkları deneysel çalışmada, Bilecik bölgesine ait mermer tozu atığı katkısının %80 kaolen, %20 bentonit içeren ve şişme potansiyeli olan kil zeminin kıvam limiti özelliklerine ve Kalifornia Taşıma Oranı'na (CBR) etkisini araştırmışlardır. Katkisız zemin ve %5, %10 ve %15 mermer tozu katkısı içeren karışımlara, kürsüz, 7 ve 28 gün kürlü durumda kuru CBR, şişme yüzdesi ve yaş CBR deneyleri uygulanmış, CBR deneyleri sonrasında da numunelerin kıvam limitleri tespit edilmiştir. Sonuçta yaş CBR değerinin kuru CBR değerinden kür durumu farketmeden %50 oranında az olduğu bulunmuş, 28 günlük kür süresi sonunda %5 mermer tozu katkısının en yüksek yaş ve kuru CBR değerini verdiği ortaya konmuştur. Ayrıca karışımdaki mermer tozu arttıkça plastikliğin azaldığı da gözlenmiştir.

Hassan vd. (2015) çalışmalarında, kil örneklerine %0 - %5 - %10 - %15 - %25 ve %35 oranlarında atık granit parçaları ekleyerek elde ettikleri karışımlar üzerinde kompaksiyon ve serbest basma deneyleri yürütmüşlerdir. Sıkıştırma deneyi sonuçlarına göre, karışımdaki granit kırığı oranı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri artmakta ve optimum su muhtevası azalmaktadır. Ayrıca, karışımlardaki granit kırığı oranı arttıkça, serbest basma dayanımı değerleri de artmaktadır.

Gürsoy vd. (2015) çalışmalarında, İzmir Körfez'inden elde edilen dip (tarama) malzemesine (CH) ağırlıkça %2,5 - %5 - %10 ve %20 oranlarında kireç ve çimento katarak doğal ve katkılı karışımlar üzerinde sıkıştırma, serbest basma ve kıvam limiti deneyleri yürütmüşlerdir. Her iki katkı da serbest basma dayanımını arttırırken çimentonun etkisinin daha fazla olduğu bulunmuştur. Katkı oranlarının %2,5 olduğu durumda dayanımdaki artış %100 civarına yükselmiştir.

Ghabae vd. (2015) çalışmalarında bentonit kilinin (CH), dayanımının kireç katkısı ile artırılabilirdiğini ortaya koymuşlardır. Katkisiz zemine, ağırlıkça %3, %6 ve %9 oranlarında kireç eklenerek serbest basma deneyleri için numuneler hazırlanmıştır. 7 - 14 ve 28 günlük kür süresi sonunda kilin dayanımının kireç oranı ve kür süresine bağlı olarak arttığı bulunmuş, dayanım artışının 14 günden sonra yavaşladığı vurgulanmıştır.

Ataşalar vd. (2015) İzmir Körfezi'nden dip taraması ile çıkarılan zeminlerin farklı oranlarda kireç ve uçucu kül katkısı ile stabilizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Deniz suyu kullanılarak hazırlanmış numuneler üzerinde yürütülen serbest basma deneyleri sonrasında optimum kireç oranı %5 ve optimum uçucu kül oranı ise %18 civarında bulunmuştur. Ayrıca deniz suyunun her iki katkı malzemesinin kullanıldığı durumda da geçerli olmak üzere numunelerin dayanımını belirgin şekilde artırdığı ortaya konmuştur.

Al-Rawas vd. (2005) şişme potansiyeli olan bir zeminin kireç, çimento, kireç ve çimento karışımı ile suni puzolan katkısı ve ısıl etki ile iyileştirilmesi konusunda çalışmışlardır. Saf çimento ve kireç katkıları %3 - %6 - %9 oranlarında değişirken denenen puzolan oranları %3 - %6 - %9 - %12 olarak seçilmiştir. Kireç ve çimento karışımlarında da oranlar %3 ve %5 kireç için %3 - %6 - %9 çimento olarak uygulanmıştır. Çalışma sonunda kireç katkısının diğer katkı malzemelerine göre çok açık bir şekilde iyileştirici etkisinin olduğu ve %6 kireç katkısının şişme yüzdesi ve şişme basıncını sıfırladığı bulunmuştur. Isıl iyileştirmenin de şişme potansiyelini sıfırladığı çalışma ile ortaya konmuştur.

Nicholson ve Kashyap (1994) Hawaii'de 5 farklı bölgeden elde ettikleri volkanik kayaların ayrışması ile oluşmuş yüksek plastisiteli killi zeminlerin (CH) uçucu kül ve uçucu kül-kireç karışımı ile iyileştirilmesi konusunda çalışmalar yürütmüşlerdir. Çalışma sonucunda %15 ve %25 oranlarında uçucu kül katkısının, 5 farklı zemin tipinde de maksimum kuru birim hacim ağırlığı azalttığını ve optimum su içeriğini arttırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca CBR değerinde artma ve şişme potansiyelinde azalma olduğu da vurgulanmıştır.

Parker vd. (1977) organik bir kilin (kalsiyum oksit içeriği %20'den az) iyileştirilmesine yönelik çalışmalarında %20 uçucu kül eklenerek hazırlanan numunelerde 7 günlük kür sonunda serbest basma dayanımının 1330 kPa'dan 2880 kPa'a yükseldiğini saptamışlardır.

2.4.2. Doğal fiber katkılı zemin iyileştirme çalışmalarına örnekler

Işık vd. (2015) çalışmalarında, atık tavuk tüyünün yüksek plastisiteli kil zemin (CH) üzerindeki iyileştirici etkisini araştırmak amacıyla bir seri serbest basma deneyi yapmışlardır. Çalışmada atık tavuk tüyü, telek ve tüy lifi olmak üzere iki kısma ayrılmış ve bunlar %1 ve %2 oranlarında kil zemine rastgele dağılımlı olmak üzere ilave edilerek numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerden bir kısmı 5 ve 10 donma-çözülme çevrimine maruz bırakıldıktan sonra katkılı/katkısız tüm numuneler üzerinde serbest basma deneyleri yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre, 4 mm telek ile donatılan numunelerin serbest basınç mukavemetinde (q_u) pozitif bir etki görülmezken, 8 mm telek donatılı numunelerde ise kayda değer bir artış olmamıştır. Tüy lifi ile donatılan numunelerde ise q_u değerleri tüm donma-çözülme çevrimlerinde artış göstermiştir.

Zuheir vd. (2015) çalışmalarında farklı oranlarda biyopolimer eklenen CL sınıfı bir düşük plastisiteli kil zemin üzerinde kompaksiyon ve serbest basma deneyleri yapmışlardır. Ağırlıkça %0 - %1 - %3 ve %5 oranlarında biyopolimer içeren kil örneklerinin sıkıştırılması sonucu; kuru birim hacim ağırlık değerlerinin azaldığı ($17,2 \text{ kN/m}^3$ - 17 kN/m^3 - $16,6 \text{ kN/m}^3$ - $15,8 \text{ kN/m}^3$), optimum su muhtevası değerlerinin ise arttığı gözlemlenmiştir (%15,8 - %16 - %17,1 - %18). Ayrıca 7 günlük kür süresi sonunda yapılan serbest basma deneylerinde dayanımın artan biyopolimer miktarı ile yükseldiği gözlemlenmiştir.

Mali ve Singh (2014) yaptıkları çalışmalarda üç eksenli hücre kesme deneyi sonuçlarını kullanarak Hindistan cevizi lifleri ile güçlendirilmiş siltli zeminlerin mukavemet davranışını incelenmişlerdir. Çalışmada kohezyonlu zeminlere fiber ilave edilerek, yanal deformasyonun azaltılması ve taşıma kapasitesinin artırılması

amaçlanmıştır. Deney sonuçları, göçmede deviatör gerilmenin fiber kullanımı ile 3,5 kata kadar arttığını göstermiştir. En iyi iyileşme fiber boyunun numunenin çapının %40'ı ile %60'ı arasında olduğu durumda elde edilmiştir. Sabit bir fiber boyu için fiber katkısı ile dayanımın arttığı, en iyi iyileşmenin %1 fiber katkısında elde edildiği bulunmuştur.

Aggarwal ve Sharma (2011) çalışmalarında 5 mm - 10 mm - 15 mm ve 20 mm uzunluğundaki jüt fiberlerin düşük plastisiteli kile (CL) %0,2 ile %1 arasında değişen oranlarda katılmasının sıkıştırma özelliklerini ve Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) değerini nasıl değiştirdiğini incelemiştir. Buna göre jüt fiber oranı arttıkça maksimum kuru yoğunluk azalmış, optimum su muhtevası ise artmıştır. Doğal zeminin CBR değeri %1,82 iken, zemine kaplanmamış fiber ilavesi durumunda CBR'ın en büyük değeri 10 mm boyunda jüt fiberin %0,8 oranında kullanılması ile %4,62 olarak elde edilmiştir. Fiberlerin bitümlerle kaplanması durumunda ise maksimum CBR değeri daha da yükselerek %5,53 olarak bulunmuştur.

Ahmad vd. (2010) siltli kumun mukavemetine rastgele dağıtılmış palm fiberin (oil palm empty fruit bunch: OPEFB) etkisini araştırmak için drenajlı (CD) / drenajsız (CU) üç eksenli basınç deneyleri yapmışlardır. Çalışmada, 15 mm - 30 mm ve 45 mm uzunluğundaki OPEFB palm fiberler %0,25 ve %0,5 oranlarında siltli kuma katılarak numuneler hazırlanmıştır. Ayrıca aynı deneyler çeşitli kimyasallarla kaplanmış fiberlerin kullanımı ile de tekrarlanmıştır. Araştırma sonuçlarına göre zemin fiber karışımının kayma direnci parametreleri artan fiber oranıyla önemli ölçüde yükselmiş, maksimum değere ise 30 mm'de ulaşılmıştır. Ayrıca göçme için gerekli şekil değiştirmelerin de değeri artmış, numuneler daha sünek bir davranış göstermişlerdir. Ancak fiber uzunluğu ve oranının çok fazla artması daneler arası kilitlemeyi azaltmış ve fiber-zemin karışımı tek bir kütle olmaktan uzaklaşmıştır. Aynı çalışmada fiberlerin kaplanması ise fiber çapının ve dolayısıyla yüzey alanının artmasına neden olmuş, böylece fiber ve zemin daneleri arasındaki sürtünme artmıştır. Örnekle, 30 mm uzunluğundaki kaplanmış fiberlerin %0,5 oranında zemine katılması zeminin sürtünme açısını yaklaşık %25 artırmıştır.

Segetin vd. (2007) 70 mm ve 85 mm uzunluğundaki emaye kaplı keten fiberleri zemin- çimento karışımına, dayanımı artırmak üzere, ağırlıkça kuru zeminin %0,6 ve %0,8'i oranlarında katarak kullanmışlardır. Araştırmacılar, keten fiberi ilavesiyle zeminin sünekliğinin arttığını, ancak bu etkinin fiber oranı ve boyundan çok karışım yöntemi tarafından yönetildiğini belirtmişlerdir. Çalışmada, 85 mm fiber boyunun elle karıştırma için sınır değer olduğu, optimum fiber oranının da %0,8 olduğu belirtilmiştir. Fiber boyunun artmasıyla dayanımın arttığı, ancak karıştırmanın pratik olarak mümkün olamadığı bulunmuştur. Ayrıca fiber oranının %0,6'dan az olması durumunda malzemenin gevrek davranış gösterdiği de ortaya çıkmıştır.

Ravishankar ve Raghavan (2004) lateritik zeminler üzerinde yürüttükleri sıkıştırma deneylerinde Hindistan cevizi lifi oranı arttıkça maksimum kuru yoğunluğun düştüğünü ve optimum su muhtevası değerinin arttığını bulmuşlardır. Ayrıca basma dayanımı %1 fiber oranına kadar artmakta, daha sonrasında ise değerler düşmektedir.

Prabakar ve Sridhar (2002) çalışmalarında sisal fiber katkısının bir c-φ zemin üzerinde sıkıştırma ve dayanım özelliklerine etkisini araştırmışlardır. 10 mm - 15 mm - 20 mm ve 25 mm uzunluğundaki sisal fiberler doğal zemine rastgele olmak üzere ağırlıkça %0,25 - %0,5 - %0,75 ve %1 oranında katılmıştır. Çalışma sonunda hem fiber oranının hem de fiber boyunun artmasıyla maksimum yoğunluk ve optimum su muhtevası azalmıştır. Fiber boyu arttıkça kohezyon değeri artarken, fiber oranının %0,75 olduğu durumda üç eksenli hücre kesme deneyinde elde edilen deviatör gerilmeler en yüksek değerine ulaşmıştır.

2.4.3. Yapay fiber katkılı zemin iyileştirme çalışmalarına örnekler

Eskişar ve Altun (2015) çalışmalarında, zemin ve fiber kompozitlerinin mekanik özelliklerini bir seri serbest basma deneyi ile incelemişlerdir. Zemine rastgele karıştırılan polipropilen (PP) fiber katkısının zemin örneklerinin basınç mukavemetlerini ve sünekliğini arttırdığı ortaya konmuş ve değişimdeki etkenler; zeminin su muhtevası ve plastisitesi ile polipropilen fiberin oranı ve uzunluğu olarak ifade edilmiştir. Çalışmada kullanılan fiber uzunlukları 6 mm ve 12 mm olup, katkı

oranları %0,1 - %0,5 ve %0,75'tir. Fiber oranının ve uzunluğunun artması serbest basınç mukavemetini arttırırken bu artışta fiber oranının daha etkin bir değişken olduğu görülmüştür.

Ayračma ve Teymür (2014) çalışmalarında ince kuma cam fiber katkısının kayma direnci ve geçirimsizlik parametrelerini nasıl değiştirdiğini incelemişlerdir. Ağırlıkça %0,25 ve %0,5 oranında cam fiber katkısı kullanılan çalışmada, kumun bağıl birim hacim ağırlığına bağlı olarak artan fiber katkısıyla kayma direncinin ve geçirimsizliğin arttığı ortaya konmuştur.

Sukontasukkul ve Jamsawang (2012) çimento katkısıyla stabilize edilmiş zeminlerin basma dayanımlarında istenen artışın elde edildiğini, ancak çekme ve eğilme davranışının yetersiz olabildiğini ve gevrek davranış görüldüğünü, deprem yükleri altında veya yanal deplasmanlar olması durumunda yenilmelerin ortaya çıktığını belirtmektedirler. Yazarlar, derin karıştırma kolonları ile stabilizasyonda bu davranışı önlemek için H kesitli çelik profillerin kullanıldığını belirtmişler, eğilme ve çekme gerilmeleri etkisindeki davranışı geliştirmek için alternatif olarak kısa fiberlerin betonda kullanımına benzer şekilde diğer katkı malzemelerine eklenerek kullanılabilceğini ortaya koymuşlardır.

Tang vd. (2012) çalışmalarında, zemin ve fiber parçaları arasındaki mikro mekanik etkileşim davranışını taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanarak ele almışlardır. Çalışma sonucunda fiber ve zemin ara yüzey kayma direncinin, zemin danelerinin etkili ara yüzey temas alanına, fiberin yüzey pürüzlülüğüne ve zemin danelerinin dizilimine bağlı olduğu öngörülmektedir.

Yılmaz ve Sevensan (2010) çalışmalarında polipropilen fiber ve polipropilen fiber + uçucu kül katkısıyla Ankara kilinin mühendislik özelliklerinin değişimini incelemişlerdir. Çalışma sonrasında fiber + uçucu kül + kil karışımlarında %1 fiber katkısının %0,5 fiber katkısına oranla serbest basma dayanımını daha çok artırdığı bulunmuştur. Ancak, fiberin uçucu kül katılmadan kullanıldığı durumlarda basma dayanımının artma yerine az da olsa düşme eğiliminde olduğu belirtilmiştir. Yazarlar,

fiber + uçucu kül + kil karışımlarında elde edilen dayanım artışının genel bir eğilime sahip olmadığını belirtmişler, bunun nedeninin de kile rastgele karıştırılan fiberlerin numunelerin olası kayma düzlemlerinde bulunup bulunmaması olduğunu belirtmişlerdir.

Zaimoğlu (2010) çalışmasında ince daneli zeminlerin serbest basma dayanımına borjips, uçucu kül, katkısız çimento ve polipropilen fiber eklenmesinin etkisini araştırmıştır. 7 günlük numuneler üzerinde yapılan serbest basma deneyleri sonrasında %10 borjips, %10 katkısız çimento ve %0,25 polipropilen fiber eklenen numunelerin maksimum basma değerini verdiği, sağlanan artışta en etkin bileşenin polipropilen fiber olduğu, ayrıca uçucu külün 7 günlük basma dayanımını artırıcı etkisinin olmadığı ortaya konmuştur.

Kim vd. (2008) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, liman tarama işleminden türetilen düşük birim hacim ağırlıklı zeminin güçlendirilmesi için çimento ve köpük yanında %0 - %0,25 - %0,5 - %0,75 ve %1 oranlarında balık ağı atığı kullanılmıştır. Çalışmada, basınç dayanımında maksimum artış ağırlıkça yaklaşık %0,25 oranında bir balık ağı atığı kullanıldığında elde edilmiştir.

Akbulut vd. (2007) killi zeminin statik ve dinamik özelliklerine hurda lastik kırpıntısı ile polietilen ve polipropilen liflerin etkisini araştırmak için katkısız ve güçlendirilmiş örnekler üzerinde serbest basma, kesme kutusu ve rezonans frekansı deneyleri yapmışlardır. Deneyler sonrasında bu malzemelerin killi zeminlerin iyileştirilmesi için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Genel olarak lastik kırpıntısı ve sentetik elyafların kilin kohezyon değerini arttırdığı görülmüş, maksimum kohezyon değeri 10 mm uzunluğundaki fiberlerde elde edilmiştir. Güçlendirilmiş numunelerin içsel sürtünme açısının doğrusal olmayan bir şekilde arttığı da bulunmuştur. Lastik kırpıntısı içeriğinin %2 oranına kadar artmasıyla serbest basma dayanımının (UCS) arttığı, bu orandan sonra ise düştüğü saptanmıştır. Polietilen ve polipropilen liflerde ise direnç artışının %0,2 fiber oranına kadar sürdüğü, sonrasında ise düştüğü bulunmuştur.

Kumar vd. (2006) yaptıkları çalışmada %0 - %0,5 - %1,0 - %1,5 ve %2,0 oranında düz ve kıvrımlı polyester fiber (3 mm - 6 mm - 12 mm) katkısı içeren kil numuneleri üzerinde serbest basma deneyleri yürütmüşlerdir. Sonuçta, fiber uzunluğu ve/veya fiber oranı arttıkça dayanımın arttığı bulunmuştur. Yüksek sıkışabilir özellikteki kilde dayanım artışının 6 mm uzunluğundaki düz fiberin %2, 12 mm uzunluğundaki düz fiberin %1,5 ve 6 mm uzunluğundaki kıvrımlı fiberin %1,5 oranında kullanılmasıyla %100 civarına yükselebildiği belirtilmiştir.

Consoli vd. (2005) polipropilen fiber katkısının üniform ince kumun kayma direnci ve isotropik gerilme altında sıkışma davranışlarına etkisini incelemiştir. Çalışmada 24 mm uzunluk ve 0,023 mm kalınlığa sahip polipropilen fiberler ağırlıkça %0,5 oranında kullanılmış, fiber katkısının kayma direncini artırması yanında fiberlerin isotropik gerilme koşullarında bile çekme gerilmesi taşıdığı ortaya konmuştur.

Kumar ve Tabor (2003) naylon fiber katkısının (ağırlıkça %0, %0,05, %0,15 ve %0,30 oranında ve minimum 2 inç uzunluğunda) siltli kil numunelerinin doruk ve kalıntı dirençleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Standart Proktor deneyinde bulunan maksimum yoğunluğun %93, %96 ve %99'u elde edilecek şekilde sıkıştırılmış katkısız ve naylon fiber katkılı numunelerde serbest basma deneyleri yürütülmüştür. Deneyler sonrasında; %93 oranında sıkıştırma enerjisi kullanıldığında %0,3 naylon fiber katkısının doruk direnci 4, kalıntı direnci ise 20 kat yükselttiği bulunmuştur.

BÖLÜM 3. BAZALT VE BAZALT FİBERLER

3.1. Bazalt

Bazalt, volkanik kaya türlerinden birisidir. Siyah renkli ve çok sert bir kayaç olan bazalt, mağma akıntılarının soğuyup büzülmesiyle oluşur. Sert ve dayanıklı bir yapıya sahip olan kayaç, geçmişten bugüne kaldırım ve yapı taşı, köprü malzemesi olarak kullanılmaktadır. Günümüzde ise bunlara ek olarak demiryolu balast malzemesi ve asfalt gereci gibi alt yapıda kullanımının yanı sıra; özellikle bünyesinde serbest silis bulunmaması nedeniyle, granül ve toz olarak; geçmişte silis ve kuvars kumu kullanılan bir çok başka iş kolunda alternatif ve sağlıklı bir hammadde olarak kullanılmaktadır (Swink, 2002). Bazalt, polimer ve düşük yoğunluklu polietilen örneğinde olduğu gibi kompozit malzeme üretiminde kullanılabilir (Akıncı, 2009; Çalışkan vd., 2011).

Bazalt yer kabuğunda %33'e varan değeriyle en bol bulunan kayaçtır. Kimyasal olarak piroksen, klinopiroksen, olivin ve plajyoklas minerallerini içermektedir. Bazalt alümina izi ile birlikte, magnezyum, kalsiyum, sodyum, potasyum, silikon ve demir oksitleri ile kimyasal olarak zengindir. Kimyasal içeriği bulunduğu coğrafyaya bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bazalt sodyum açısından zengin ve silis açısından fakir ise toleyitik bazalt, bileşimde silis eksik ise alkali bazalt olarak sınıflandırılmaktadır. Tablo 3.1.'de farklı ülkelerde bulunan bazaltların kimyasal bileşenleri örnek olarak gösterilmektedir (Yılmaz, 2015).

3.2. Türkiye Bazaltları

Türkiye'nin bazaltik kayaçlar birçok bölgede bulunmaktadır Şekil 3.1.'den Afyonkarahisar, Kars, Ardahan, Elazığ, Eskişehir, Gaziantep, Şanlıurfa, Van,

Erciyes, Konya, Doğu Anadolu ve Manisa Kula'da rastlandığı görülebilir. Tablo 3.2. Türkiye'de bulunan bazaltların kimyasal içeriklerini göstermektedir (Yılmaz, 2015).

Tablo 3.1. Bazaltların kimyasal bileşimleri

Bileşim	Toleit	Olivin bazaltı	Alkali bazalt
Oksit	Westfield (A.B.D)	Kilauea (Hawaii)	Uganda (Afrika)
SiO ₂	51,60	49,43	44,45
Al ₂ O ₃	14,10	12,92	11,74
TiO ₂	1,00	2,85	2,58
Fe ₂ O ₃	4,40	3,14	2,06
FeO	8,40	8,34	8,95
MnO	0,20	0,18	0,16
MgO	6,40	9,24	13,32
CaO	9,30	11,02	10,24
Na ₂ O	3,20	2,22	2,54
K ₂ O	1,20	0,52	2,92
P ₂ O ₅	0,20	0,26	0,62

Tablo 3.2. Türkiye bazaltlarının kimyasal bileşenleri (% ağırlıkça)

Oksit	Manisa Yöresi (Kula)	Konya Yöresi (Acıgöl)	Erciyes Dağı (Akdere)	Doğu Anadolu (Nemrut Kayaçları)
SiO ₂	47,5 - 48,24	50,13	47,50	46,55
Al ₂ O ₃	18,52 - 20,95	17,60	18,04	13,23
Fe ₂ O ₃	3,29 - 4,75	2,49	3,13	1,90
FeO	5,2 - 6,32	5,00	6,41	7,14
CaO	7,56 - 8,37	11,26	10,35	18,9
MgO	4,36 - 5,54	7,09	7,18	7,88
Na ₂ O	5,08 - 7,66	4,04	3,50	2,96
K ₂ O	0,69 - 2,31	0,91	0,49	1,26
P ₂ O ₅	0,13 - 0,97	0,18	0,22	0,22
H ₂ O	0,02 - 0,46	0,16	-	0,36
TiO ₂	-	-	1,36	2,29
MnO	-	-	0,14	0,18



Şekil 3.1. Türkiye bazalt haritası

3.3. Bazalt Fiber

ABD'de bir Fransız bilim adamı 1923 yılında bazalt elyaf üretim tekniğini ilk kez açıklayarak patent almıştır. Daha sonrasında konu ile ilgili çalışmalar Rusya'da başlamış, SSCB'nin dağılması ile birlikte teknoloji diğer ülkelere de yayılmıştır (Saravanan, 2006).

Gao vd. (2015) bazalt fiberlerin fiyatının geleneksel fiberlere oranla onda bir mertebesinde olduğunu, ayrıca çekme dayanımı ve elastisite modülünün propilen fiberlere oranla çok daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

3.3.1. Bazalt fiberlerin üretimi

Doğal olarak oluşan kayalardan elde edilen fiberler yüksek stabilite sağlamaktadır. Mineral bazlı fiberlerin nihai özellikleri kullanılan mineralin kimyasal kompozisyonu, termal geçmişi, üretim şartları, filament çapları ve uygulanan kimyasal yüzey aprelemesine göre şekillenir. Bazalt fiberler doğal volkanik bazalt kayalarının başka bir katkı olmaksızın 1500-1700°C'leri bulan yüksek sıcaklıklarda eritilmesi ve fiber olarak çekilmesi ile elde edilirler. Elde edilen fiberlerin özellikleri bazaltın alındığı ocağın kimyasal bileşimine göre değişiklik göstermektedir (Swink, 2002).

Bazalt fiberler ve cam fiberlerin üretimleri birbirine benzemektedir. Cam fiber ve bazalt fiberlerin üretiminde kullanılan ekipmanlar birbirine benzerken sıcaklık ve

viskozite parametreleri değişiklik göstermektedir. Bazalt fiberlerin üretiminde dışarıdan herhangi bir ilave katkı malzemesine gerek duyulmaz. Bazalt kayaçları kırılıp yıkanarak kurutma işlemine tabi tutulurlar ve sonrasında doğrudan fırına konur 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 yüzlerce mikro delik bulunan platin bir burca beslenir ve bu deliklerden akışı sağlanarak filament olarak çekilme işlemi yapılır. Üretilen filament çaplarının kontrolü delik çapları ve bazaltın viskozitesi ile sağlanır. Çekilen filamentler su ile soğutulur ve katılaşmaları sağlanır. Elde edilen filament çapları 7 ile 20 µ arasında değişir. Daha sonra kullanım amacına göre gereken tasnifi yapılabilir (Swink, 2002).

3.4. Bazalt Fiberlerin Özellikleri

Bazalt fiberler, genellikle yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan, kimyasal olarak inaktif ve aşınma direnci yüksek malzeme üretiminde kullanılırlar. Bazalt fiberleri durabilite, sıcaklığa karşı direnç ve dayanım yönünden güçlü kılan özelliği volkanik kayaçlardan elde edilmesidir (Kızılkant vd., 2014). Bazalt fiberler aşağıdaki özelliklere sahiptir.

3.4.1. Mekanik mukavemet

Bazalt fiberin çekme mukavemeti 3000-4840 MPa ile E-cam fiberden daha yüksektir. Diğer fiberlere göre daha özgül ağırlığı biraz daha yüksek olup 2,65-2,80 arasındadır.

3.4.2. Kimyasal direnç

Bazalt fiberler 13-14 pH değerine kadar dayanabilmesi ile, alkali ortama karşı çok iyi bir dirence sahiptir. Aynı zamanda, iyi bir asit ve tuz direncine sahiptir.

3.4.3. Korozyon ve mantar direnci

Bazalt fiber yüksek korozyon direncine sahiptir. Aynı zamanda, su, hava ya da gaz ile herhangi bir toksik reaksiyona uğramaz. Bazalt fiberlerin nem içeriği %1'den daha az değerlerde bulunmaktadır. Bazalt malzemeler mantar ve mikro organizmaların etkisine karşı dirençlidir.

3.4.4. Ekolojik yapı

Doğal bazaltdan üretilen fiberler sağlık açısından hiçbir zararlı madde içermezler, biyolojik bir tehlikesi yoktur. Bazalt fiber üretiminde cam yakma sırasında oluşan fırın tıkanıklıklarına benzer bir durum oluşmaz. Doğal bir malzeme olması ve herhangi bir katkı içermemesi bazalt fiberlerin çevre dostu olarak anılmasını sağlamaktadır. Parnas vd. (2007) cam elyaf imalatı sırasında kullanılan borik asit gibi katkıların bazalt fiber imalatında kullanılmamasının teknik olarak imalatı zorlaştırdığını, ancak elde edilen mekanik özelliklerin çok daha iyi olduğunu belirtmektedir. Tablo 3.3.'te bazalt fiberlerle diğer fiberlerin karşılaştırması gösterilmektedir.

Tablo 3.3. Bazalt fiberlerin diğer fiberlerle karşılaştırılması (Kumbhar, 2014)

Uygunluk	Basalt fiber	E-Cam fiber	S-Cam fiber	Polyamid fiber	Karbon fiber
Gerilme direnci, (MPa)	3000-4840	3100-3800	4020-4650	2900-3450	3500-6000
Elastisite modülü, (GPa)	79,3-93,1	72,5-75,5	83-86	70-140	230-600
Kopmada uzama, (%)	3,1-6	4,7	5,3	2,8-3,6	1,5-2,0
Özgül ağırlık	2,65-2,8	2,5-2,62	2,46	1,44	1,75-1,95
Lif çapı, (µm)	6-21	6-21	6 - 21	-	5-15
Uygulama sıcaklığı, (°C)	-260-500	-50-380	-50 - 300	-50 - +290	-50 - +700
Erime sıcaklığı, (°C)	1450	1120	1550	-	-

3.5. Bazalt Lif Ürünleri

Bazalt lif ürünleri, kıyılmış bazalt lifler, bazalt ip (lif) ve bazalt çubuklar olarak kullanılmaktadır.

Kıyılmış bazalt lifler, Türkiye ve birçok ülkede yaygın olarak kullanılan bir üründür. Farklı boyutlarda üretilmektedir. 5 ile 100 mm arasında bir uzunluğa, 7-20 mikron arasında bir çapa sahip bazalt fiberler betonu güçlendirmek için kullanılmaktadır. Bazalt lif betonun yorulma/aşınma direncini arttırmak için iyi bir malzemedir (Şekil 3.2.).



Şekil 3.2. Kıyılmış bazalt fiberler

Bazalt ip, lif ve sentetik elyaf kumaşa alternatif olarak, havacılık sektöründe, otomotiv ve inşaat sektöründe kullanılır (Şekil 3.3.).



Şekil 3.3. Bazalt ip, lif (Kumbhar, 2014)

Bazalt donatı çubukları epoksi ile bağlanmış %80 oranında bazalt fiber ihtiva ederler. Betonla aynı mertebede genişleme katsayısına ($8 \text{ ppm}^{\circ}\text{C}$) sahip olduklarından betonun performansını artırırılar. Bazalt donatı çubukları Şekil 3.4.'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Bazalt çubuklar (Kumbhar, 2014).

3.6. Bazalt Fiberin Betonda Kullanımı

Doğal bazalttan üretilen fiberlerin betonun özelliklerini iyileştirmede sıklıkla kullanıldığı bilinmektedir.

Seis ve Beycioğlu (2015) çalışmalarında beton içinde çelik çubuklar yerine bazalt fiberle güçlendirilmiş polimer çubukların kullanılması durumunda akma dayanımının 2.08 kat, çekme dayanımının ise 1.79 kat daha büyük elde edildiğini bulmuşlardır.

Beycioğlu ve Aruntaş (2014) tarafından yapılan çalışmada bazalt lifli donatının yüksek dayanımlı betonla olan aderans ilişkisi çelik donatı ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmada, bazalt lifli yapay donatı ve çelik donatı içeren yüksek dayanımlı beton üretilip kullanılmıştır. Beton dayanımı, 28 günlük kür süresi sonunda 75,06 MPa ve 90 günlük kür süresi sonunda ise 79,84 MPa değerine ulaşmıştır. Çalışmada elde edilen bulgulara göre 20Ø kenetlenme boyu kullanıldığında bazalt lifli yapay donatının, referans donatı olan çelik donatıda olduğu gibi hem 28 hem de 90 günlük kür süreleri sonunda betondan hiç sıyrılmadığı görülmüştür.

Kabay (2014) bazalt fiber kullanarak ürettiği betonlarda basma dayanımında azalma, eğilme dayanımında ise artış meydana geldiğini bulmuştur. Çalışmada, hacimce %0,07 ve %0,14 oranında bazalt fiber kullanılmış, 350 dozlu betonun basınç dayanımınının 0,45 ve 0,60 su/bağlayıcı oranlarında sırası ile %8-18 ve %4-9 oranlarında azaldığı bulunmuştur. Ayrıca düşük oranlarda kullanılsalar dahi bazalt fiberlerin, fibersiz betonla kıyaslandığında betonun eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi gibi parametrelerini belirgin bir şekilde arttırdığı, kullanılan fiber uzunluğunun da bu parametrelere etki ettiği belirtilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda 24 mm uzunluğunda bazalt fiberler betona %0,14 oranında ilave edildiğinde düşük su/çimento oranına sahip yüksek dayanımlı betonda kırılma enerjisinin %126, yüksek su/çimento oranına sahip normal dayanımlı betonda ise %140 oranında arttığı bulunmuştur.

Chaohua vd. (2014) yaptığı çalışmada, bazalt fiberin normal dayanımlı betonun basınç dayanımına olumsuz bir etkisinin olmadığını rapor etmiştir. Bunun ötesinde bazalt fiber ilavesi ile betonların basınç dayanımlarının erken yaşlarda arttığı, bu artışın 7. günde 22 mm uzunluğundaki fiberlerin hacimce %0,3 oranında kullanılması halinde yaklaşık %10 kadar olduğu tespit edilmiştir. İlerleyen yaşlarda yapılan basınç deneylerinde ise fiber katkısız betona göre bazalt fiber katkılı betonların basınç dayanımında gösterdiği olumlu etkinin görece azaldığı, hatta dayanımları olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Bunun nedeni ise, ilerleyen yaşlarda fiberler ile beton arayüzündeki aderansın zamanla azalması şeklinde ifade edilmiştir. Yazarlar, betonda kullanılması gereken optimum bazalt fiber oranını hacimce %0,3 olarak önermişlerdir.

Borhan (2012, 2013) cam kırıklarını ince agrega olarak kullandığı çalışmalarında hacimce %0,1 - %0,3 ve %0,5 oranlarında bazalt lif katkısı kullanarak betonlar üretmiş, %0,3'e kadar artan lif hacmiyle birlikte betonun basınç ve çekme dayanımlarının arttığını, %0,5 lif katkılı betonlarda ise basınç ve çekme dayanımlarının azaldığını tespit etmiştir. Aynı çalışmada bazalt lif katkılı betonun elastisite modülü de çekme dayanımı ve basınç dayanımı ile paralellik göstermiş, %0,3 lif oranına kadar artış, sonrasında azalma görülmüştür.

Colombo vd. (2011) çalışmalarında, bazalt fiber katkıli karışımların yorulma ve statik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla numuneler üzerinde çekme deneyi, basınç deneyi, katman ayrılması deneyi ve yorulma deneyleri yapmışlardır. Çalışmada vinil ester reçine ve epoksi reçine katkıli olmak üzere iki çeşit bazalt fiber levha üretilmiştir. Her iki tür için de bazalt fiber oranı hacimce %50 olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda epoksi katkıli bazalt fiber numunelerinin vinil ester katkıli bazalt fiber numunelerine göre optimum çekme dayanımında %29, basınç dayanımında ise %85 artış görüldüğü bulunmuştur.

Sim vd. (2005) çalışmalarında, bazalt fiberlerin betonarme yapılar için güçlendirme malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada, 2,593 gr/cm³ yoğunlukta ve 10,6 µm çapında bazalt fiber kullanılmış ve çekme dayanımı, elastisite modülü ve kopma anındaki uzaması belirlenmiştir. Ayrıca betonarme kirişlerde eğilme performansı değerlendirilmiştir. Karşılaştırma için cam fiber ve karbon fiber numuneleri de kullanmıştır. Üç farklı fiber (bazalt, cam, karbon) alkali çözeltisine batırıldığında bazalt ve cam fiber yüzeylerinde tepkime ürünü oluşarak hacim ve dayanım kaybı gözlenirken, karbon fiber kayda değer bir değişiklik göstermemiştir. Hızlandırılmış hava şartları altında, bazalt ve cam fiberin dayanım kaybının başladığı kesin sıcaklık gözlemlenmiş, ancak bazalt fiberde dayanım kaybının, cam fiberle karşılaştırıldığında daha yavaş gerçekleştiği görülmüştür. Fiberler 2 saatlik bir süreyle 600°C'nin üstünde bir sıcaklığa maruz bırakıldığında, sadece bazalt fiber hacimsel bütünlüğünü ve dayanımının %90'ını muhafaza etmiştir. Kirişlerin eğilme dayanımı ise kullanılan bazalt fiber tabaka sayısına göre %27'lere ulaşmıştır. Elde edilen deney sonuçları, iki katmanlı bazalt fiberin malzeme verimliliğini artırarak daha iyi bir güçlendirme yapısı ortaya koyduğunu göstermiştir.

Dias ve Thaumaturgo (2005) çalışmalarında %0 - %0,5 ve %1 bazalt fiber katkıli geopolimer ve normal betonların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bazalt fiberlerin, polimer betonların çekme dayanımlarını hacimce %0,5 oranında kullanıldıklarında %34, %1 oranında kullanıldıklarında ise %25 arttırdığı tespit edilmiştir. Basınç dayanımlarının ise hacimce %1'e kadar fiber kullanıldığında önemli ölçüde değişmediği, ancak bu oranda normal betonlarda basınç dayanımının

%26,4 oranında azaldığı görülmüştür. Eğilme dayanımlarında ise %1 fiber katkı normal betonlarda %46 oranında, polimer betonlarda ise %31 oranında bir artış olduğu belirtilmiştir.

3.7. Bazalt Fiber Katkısı ile Zemin İyileştirmesi Örnekleri

Gisymol ve Ramya (2017) çalışmalarında doğal bazalt fiberin, yüksek plastisiteli silt zeminin geoteknik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. 10 mm, 20 mm ve 30 mm uzunluğunda hazırlanmış bazalt fiberler doğal zemine ağırlıkça %0,05, %0,10 ve %0,15'i oranlarında ilave edilmiş ve zeminler sıkıştırıldıktan sonra serbest basma deneylerine tabi tutulmuşlardır. Deneysel sonuçlar, bazalt fiberin zeminin dayanımı üzerinde etkisi olduğunu göstermiş, boydaki artışın dayanımı %26'ya, oran artışının ise dayanımı %94'e kadar artırdığı belirlenmiş, ancak 30 mm boy için ise artış oranının azaldığı belirtilmiştir.

Özdemir vd. (2016) çalışmalarında kireç katkı/katkısız kaolin tipi CH kil zeminin dayanımına 6 mm uzunluğundaki bazalt fiberin %0,5 ve %1 oranında eklenmesinin etkisini zamana bağlı olarak incelemişlerdir. Çalışma ile, bazalt fiberin kireçli ve kirecsiz numunelerin tamamında dayanımını artırdığı ortaya konmuştur. En yüksek dayanım artışlarının kür süresinin 28 güne çıkmasıyla elde edilmesinin nedeni; kil mineralleri ile kirecin reaksiyonları ile oluşan silikat jelinin boşlukları doldurarak daneleri birbirine bağlaması olarak açıklanmıştır. 28 gün sonrasında %9 kireç ve %1 bazalt fiber katkısının dayanımda 5,5 kat artış sağladığı ve bunun çalışmada elde edilen en büyük değer olduğu gözlemlenmiştir.

Gao vd. (2015) çalışmalarında bazalt fiber eklenmiş düşük plastisiteli kil (CL) zeminin serbest basma dayanımındaki değişimleri incelemişlerdir. Çalışmada 4 mm - 8 mm - 12 mm ve 15 mm uzunluğundaki bazalt fiberler kile sırasıyla ağırlıkça %0,05 - %0,10- %0,15 - %0,20 - %0,25 - %0,30 ve %0,35 oranında eklenmiştir. Deneyler sonrasında 12 mm uzunluğundaki bazalt fiberin kile %0,25 oranında katıldığı durumlarda dayanımın en fazla arttığı bulunmuştur.

BÖLÜM 4. MALZEMELER VE METOT

Bu bölümde kullanılan malzemelerin özellikleri, karışım oranları ve numunelerin hazırlanışı hakkında bilgiler verilmiştir. Kullanılan deney düzenekleri ve deney yöntemleri tanıtılmış, deney sonuçları tablolar ve grafikler halinde sunulmuştur. Zemine bazalt fiber katkısının etkisi, fiber boyu ve katkı oranı değişkenlerine bağlı olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada, doğal zemine (Adapazarı silti) 6 mm - 12 mm ve 24 mm uzunluğundaki bazalt fiberler %1 - %1,5 ve %2 oranında katılarak doygun olan ve doygun olmayan numuneler hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde üç eksenli hücre kesme deneyleri yapılmıştır.

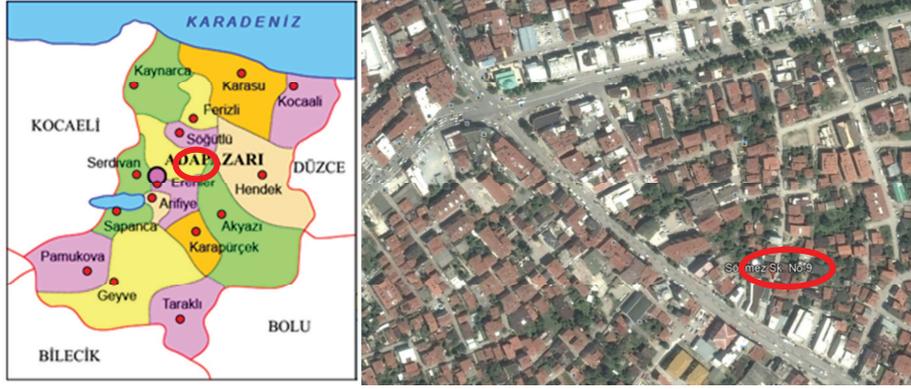
4.1. Malzemeler

4.1.1. Silt zemin

Deneysel numune olarak, Adapazarı Yenigün Mahallesi Tacettin Sert arazisinden 3 - 4 m derinlikten alınan silt kullanılmıştır (Şekil 4.1.). Öncelikle deneylerde kullanılacak miktarda numune stok alanından el arabası yardımıyla laboratuvar içerisine taşınmış, 2,36 mm açıklıklı elekten elenerek içine karışmış yabancı maddelerden arındırılmış (Şekil 4.2.) ve yere serilerek havada kurutulmuştur (Şekil 4.3.). Tablo 4.1.'de silt zeminin fiziksel özellikleri gösterilmektedir.

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 sunulmaktadırlar. Şekil 4.4'te bazalt fiberlerin farklı görünümleri sunulmaktadır. Tablo 4.2. çalışmada kullanılan bazalt fiberlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini göstermektedir.



Şekil 4.1. Çalışma alanı ve numune alımı



Şekil 4.2. Numunenin depo alanından laboratuvara taşınması ve 2,36 mm açıklıklı elekten elenmesi

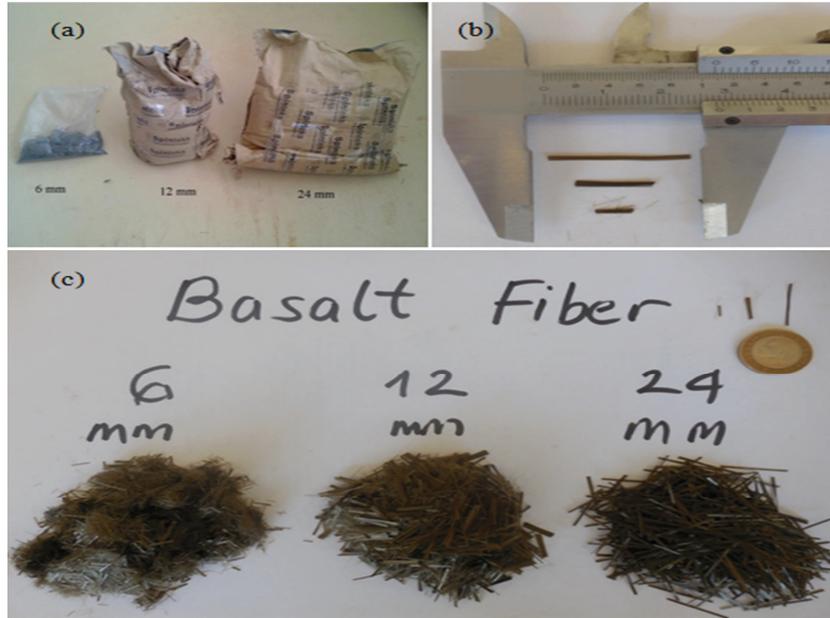


Şekil 4.3. Elenen siltin serilip kurutulması

Tablo 4.1. Silt zemin fiziksel özellikleri

Özellik	Değer	Simge ve Birim
- No200	88,3	FC (%)
Likit limit	33	LL (%)
Plastik limit	25	PL (%)
Plastisite indisi	8	IP (%)
Optimum su muhtevası	21	w_{opt} (%)
Maksimum kuru birim hacim ağırlık	15,8	γ_{kmak} (kN/m ³)
Özgül ağırlık	2,67	G_s
Kil oranı	8-11,7	C (%)

Zemin Sınıfı: Düşük Plastisiteli Silt (ML)



Şekil 4.4. Bazalt fiberler (a) torbalanmış bazalt fiberler (b, c) değişik uzunluklardaki bazalt fiberler

Tablo 4.2. Bazalt fiberin fiziksel ve mekanik özellikleri

Bazalt fiber		
Özellik	Değer	Birim
Özgül ağırlık	2,60-2,65	kN/m ³
Elastisite modülü	70-90	GPa
Çekme dayanımı	2800-3000	MPa
Kopma uzaması	3,1 - 6	%
Çapı	6 - 25	μ m
Uygulamanın sıcaklığı	(-250) - (550)	$^{\circ}$ C
Erime noktası	1350	$^{\circ}$ C
Fiyat	6	USD/Kg

4.2. Metot

Deneysel çalışmada öncelikle kullanılan zeminin sınıfını belirlemek için TS 1900-1 uyarınca likit limit, plastik limit ve elek analizi deneyleri yapılmış, ayrıca kil yüzdesinin belirlenmesi için hidrometre ve pipet analizi, özgül ağırlığın belirlenmesi için de piknometre deneyleri yapılmıştır. Daha sonra doğal zemin ve fiber katkılı zeminler üzerinde kompaksiyon deneyleri yapılarak optimum su içerikleri ve maksimum birim hacim ağırlıklar belirlenmiştir.

Bazalt fiber katkısının belirlenmesinden önce doğal silt zeminin doymuş olan ve doymuş olmayan durumlarda drenajsız kayma direncini belirlemek üzere hazırlanan numuneler üzerinde konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyleri (UU) yapılmıştır. Çalışmanın birinci safhasında doymuş olmayan durumda numuneler elde etmek amacıyla, yaklaşık 2 kg civarında doğal kurutulmuş numuneye 100 ml - 200 ml - 300 ml - 400 ml ve 500 ml civarında su katılarak farklı su içeriklerinde karışımlar hazırlanmış ve bunlar standart proktor enerjisi ile sıkıştırılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında ise doymuş zemin örnekleri, 100 kPa - 200 kPa ve 300 kPa düşey gerilme altında konsolidasyona tabi tutularak elde edilmiştir. Birinci aşamada kompaksiyondan, ikinci aşamada ise konsolidasyon sürecinden sonra elde edilen her bir numuneden 4'er adet silindirik numune alınarak farklı çevre basınçlarında (100 kPa - 200 kPa - 300 kPa ve 400 kPa) UU deneyleri yapılmıştır. Çalışmanın her iki safhasında doğal numuneler üzerinde deneyler bitirildikten sonra aynı işlemler 6 mm - 12 mm ve 24 mm boylarında bazalt fiberlerin, doğal zemine ağırlıkça %1 - %1,5 ve %2 oranında karıştırılarak elde edilmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerinde kullanılan bazalt fiber boy ve oranları Tablo 4.3.'te verilmiştir. Bunun yanında makroskopik görüntüler ve mikroyapı arasında bir korelasyon oluşturmak için, SEM analizleri doğal zemin örnekleri ve bazalt fiberleri ile güçlendirilmiş örnekler üzerinde gerçekleştirmiştir.

Tablo 4.3. Hazırlanan karışımlarda silt ve fiber ağırlığı, fiber boy ve oranları

Karışım No	Numune tanımı	Silt ağırlığı (gr)	Fiber ağırlığı (gr)	Fiber uzunluğu (mm)	Fiber oranı (%)
1	Doğal zemin (Silt)	2000	0	0	0
2	%1 Fiber katkılı silt	2000	20	6	1
3	%1,5 Fiber katkılı silt	2000	30	6	1,5
4	%2 Fiber katkılı silt	2000	40	6	2
5	%1 Fiber katkılı silt	2000	20	12	1
6	%1,5 Fiber katkılı silt	2000	30	12	1,5
7	%2 Fiber katkılı silt	2000	40	12	2
8	%1 Fiber katkılı silt	2000	20	24	1
9	%1,5 Fiber katkılı silt	2000	30	24	1,5
10	%2 Fiber katkılı silt	2000	40	24	2

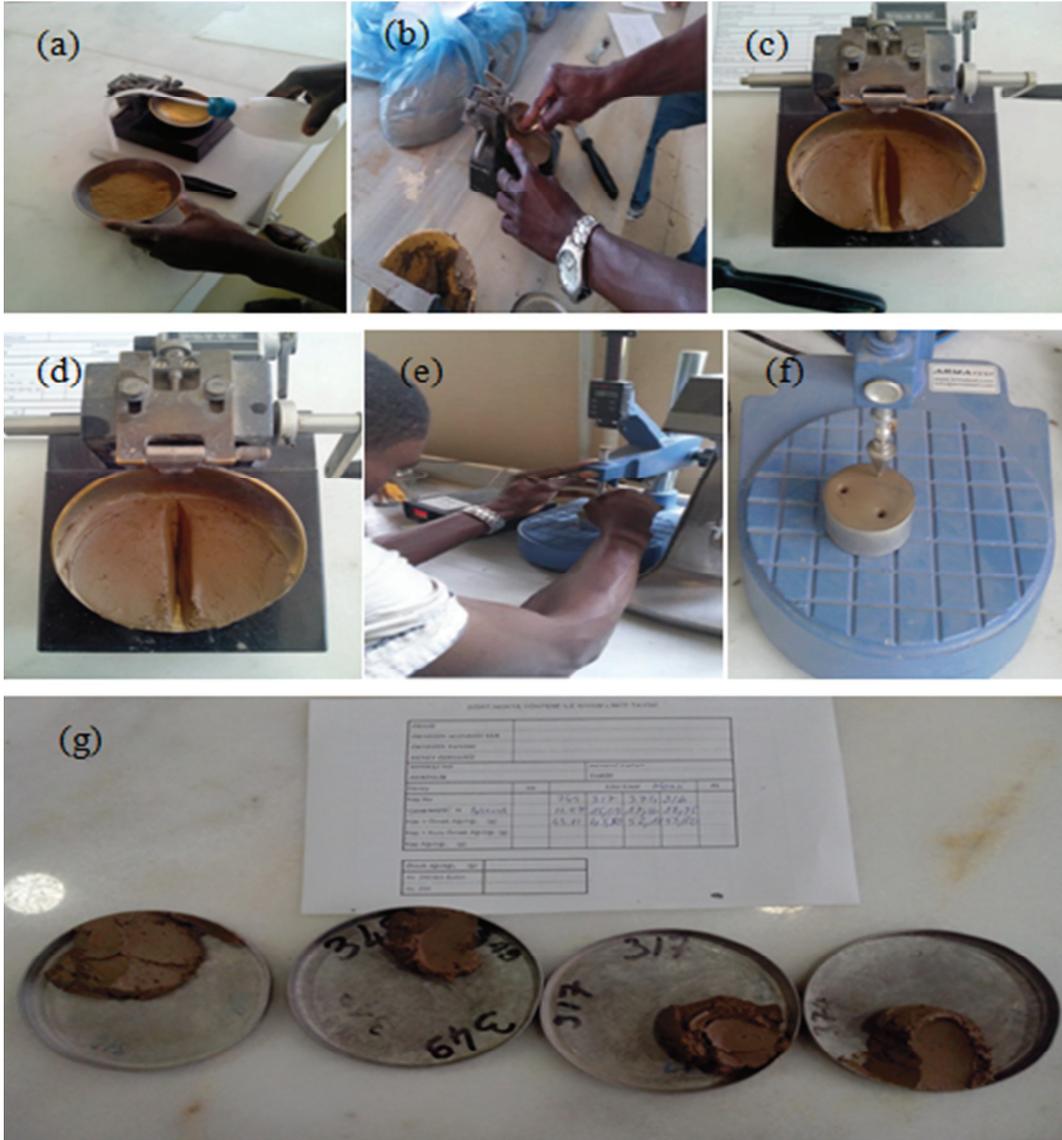
4.2.1. Fiziksel deneyler

Sınıflama deneyleri doğal numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler; Casagrande yöntemi ve koni düşürme yöntemi ile likit limit deneyleri, plastik limit deneyleri ve elek analizi deneyleridir. Kil yüzdesinin bulunması amacıyla ek olarak hidrometre ve pipet deneyleri, özgül ağırlığın bulunması amacıyla da piknometre deneyi yapılmıştır.

4.2.1.1. Kıvam limiti deneyleri

İnce daneli kuru karışımlar, su ile karıştırıldıklarında toz görünümünden çamura, su miktarı kademe kademe arttırılırsa, sıvıya dönebilmektedir. Bu reaksiyon değişimine kıvam denmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan siltin kıvam özelliklerini belirlemek amacıyla TS1900-1 uyarınca kıvam limiti deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonrasında sınıflandırma için de TS 1500/2000 standardı kullanılmıştır. Şekil 4.5’de siltli zemin üzerinde Casagrande ve düşen koni yöntemleriyle yapılan likit limit deneylerine ait fotoğraflar görülmektedir. Casagrande yönteminde su ile karıştırılıp homojen hale getirilen zemin cihazın kabı içine yaklaşık olarak 1 cm kalınlığında olmak üzere konmakta ve numunenin yüzeyi yatay olacak şekilde düzeltilmektedir. Daha sonra oluk açma bıçağıyla tabanı 2 mm olan bir oyuk açılmakta ve cihazın kolu

saniyede 2 sefer olmak üzere 1 cm yüksekliğe çıkarılıp düşürülmektedir. Yarığın 13 mm civarında bir uzunlukta kapanması ile o su muhtevası için deney sonlandırılmakta ve su muhtevasının ölçümü için numune alınmaktadır. Deney sırasında eklenen su miktarları, elde edilen düşüş sayılarının 10 ile 50 arasında eşit aralıklarla dağılma elde edilebilecek biçimde ayarlanmaktadır. Numunenin su içeriğinin artırılması ile yürütülen deney toplamda en az dört kez uygulanmaktadır. Deney sonunda 25 vuruşa karşılık gelen su muhtevası likit limit (w_L) olarak alınmaktadır.



Şekil 4.5. Casagrande ve koni yöntemi ile likit limitin bulunması, (a) zemini su ile karıştırma, (b, c) Casagrande deneyinde cihazın içine zemin konulması, (d) Casagrande deneyi sonrası numune görünümü, (e) koni deneyi, (f) iki batma sonrası siltli zemin görünümü, (g) su içeriklerinin belirlenmesi için alınan örnekler

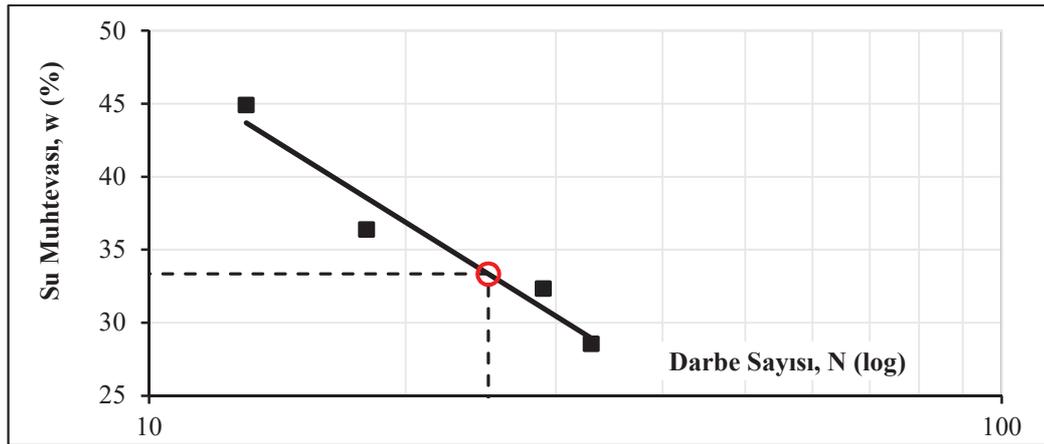
Düşen koni yöntemi, konik şekilli bir metalin kendi ağırlığı ile önceden bir su içeriğinde hazırlanan homojen zemin çamurunun içine batırılması esasına dayanmaktadır. Koninin zemine batması için 5 sn süreyle koni serbest düşmeye bırakılmakta, bu süre sonunda batma miktarı ölçülmektedir. Bir su muhtevası için batırma işlemi 3 kez tekrarlanmakta ve ortalama batma değeri dikkate alınmaktadır. Deney sırasında eklenen su miktarları, elde edilen batma miktarının tercihen 15 mm ile 25 mm arasında ölçülmesini sağlayacak şekilde ayarlanmaktadır. Ardından bir miktar numune alınıp su muhtevası ölçümü için etüve yerleştirilmektedir. Bu işlem artan su içerikleri için en az 3 kez tekrarlanıp 20 mm batmaya karşılık gelen su muhtevası değeri likit limit (w_L) olarak alınmaktadır.

Plastik limit (w_P), ıslak zeminin yuğrulma sırasında 3 mm kalınlığa indiğinde yüzeyinde çatlakların belirmesi durumundaki su içeriği olarak tanımlanmaktadır. Plastik kıvamdan, yarı katı kıvama geçiş şartları içinde bulunan zeminin kıvamı plastik limit ile belirlenmektedir. Şekil 4.6.'da plastik limit deneyi sırasında çekilen fotoğraflar görülmektedir.

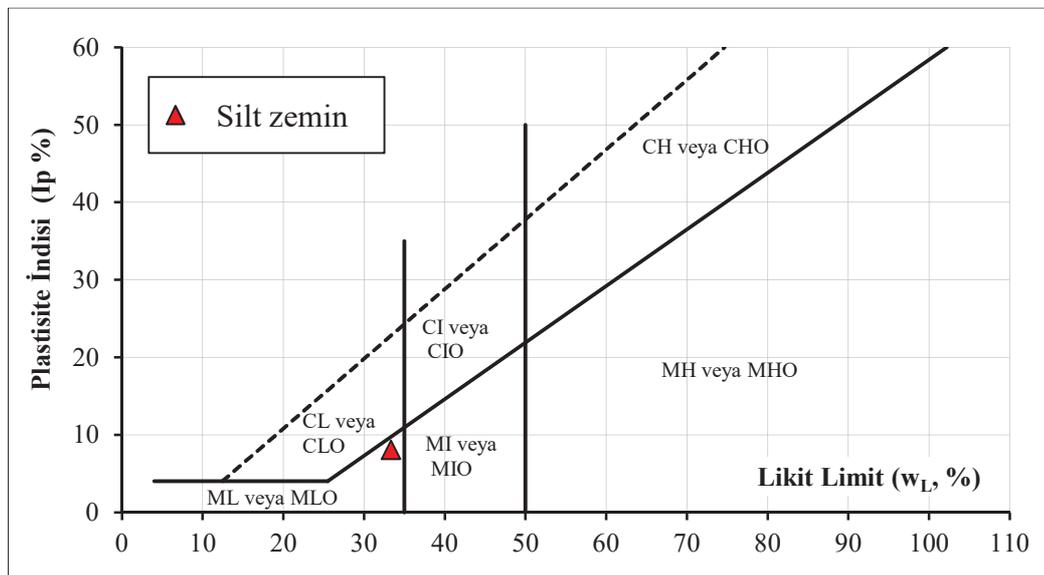


Şekil 4.6. Plastik limit deneyi, (a) numune, (b) yuvarlama işlemi, (c) 3 mm çapında çatlama numune

Şekil 4.7.'de Casagrande cihazı ile yapılan likit limit deney sonuçları görülmektedir. Şekil 4.8.'de ise silt zeminin TS1500 plastisite kartındaki konumu görülmektedir.



Şekil 4.7. Likit limit akma doğrusu



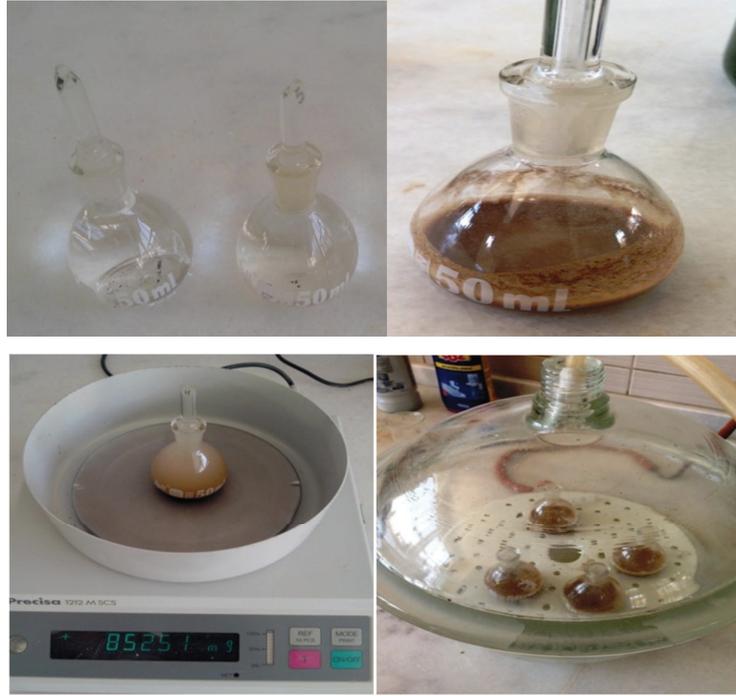
Şekil 4.8. Siltin TS 1500/2000 plastisite kartındaki yeri

TS 1500/2000'e göre, ince daneli zemin A doğrusu altında kalıyorsa siltli zemin (M) olarak sınıflandırılmaktadır. Likit limiti 35'den az olan siltli zemin de düşük plastisiteli olarak değerlendirilir ve ML simgesini alır. Tablo 4.2.'de de görülebileceği üzere deney sonuçlarına göre çalışmada kullanılan siltin likit limiti 33, plastik limiti 25 ve plastisite indisi de 8 olduğundan TS1500/2000'e göre simgesi ML (düşük plastisiteli silt) olarak bulunmuştur.

4.2.1.2. Özgül ağırlık deneyi

Bu deneysel çalışmada, özgül ağırlık deneyi TS 1900-1/2006'ya göre yapılmıştır (Şekil 4.9.). 50 ml'lik şişe piknometrelerin kullanıldığı deneylerde, öncelikle

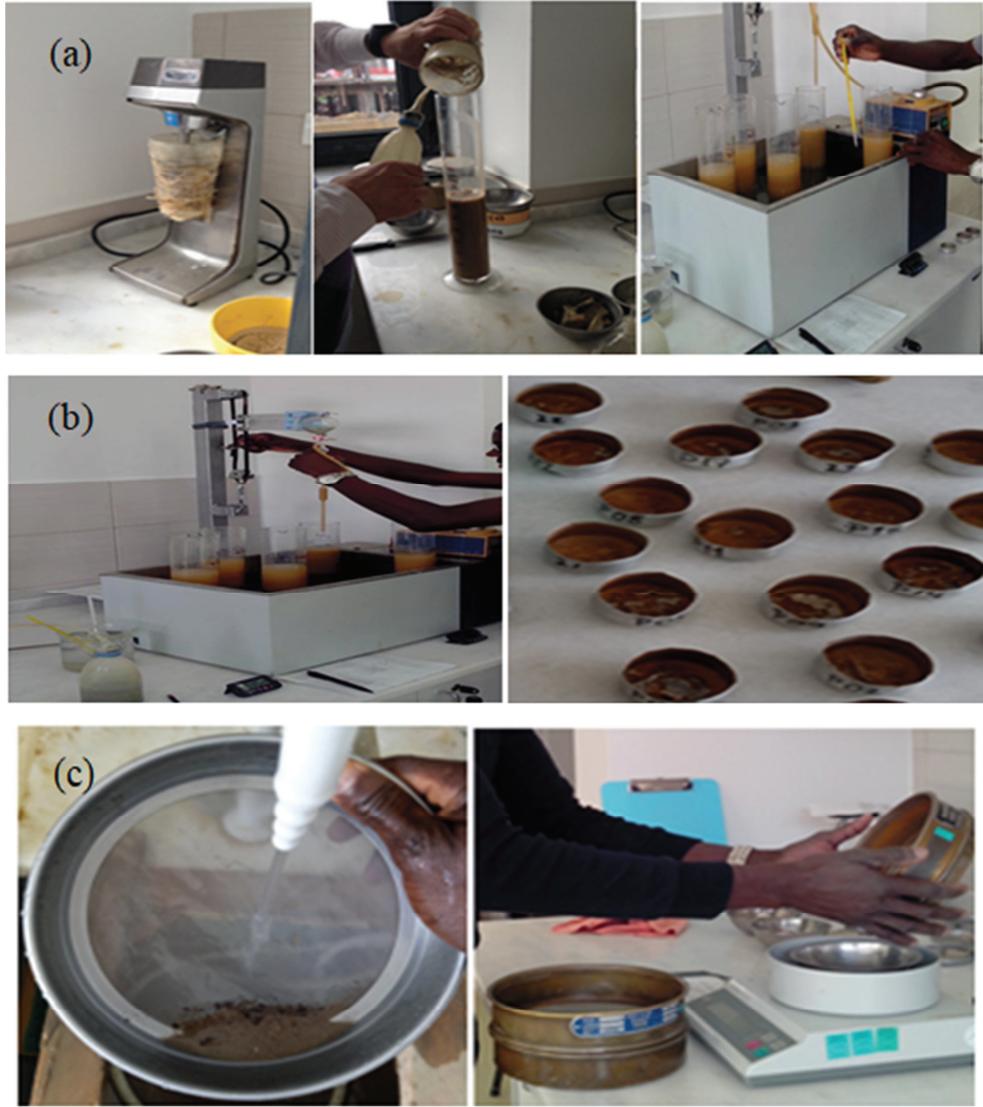
piknometre şişeleri, 105°C sıcaklıkta kurutulmuştur. Deneyde en önemli nokta; piknometre içinde su ve su + numune bulunan durumlarda tartımlar sırasında kesinlikle hava kalmamasının sağlanması gerekliliğidir. Bunun sağlanması amacıyla piknometre şişeleri desikatöre yerleştirilerek vakum uygulanmıştır. Özgül ağırlık değeri Tablo 4.2.'de de görülebileceği üzere 2,67 olarak bulunmuştur.



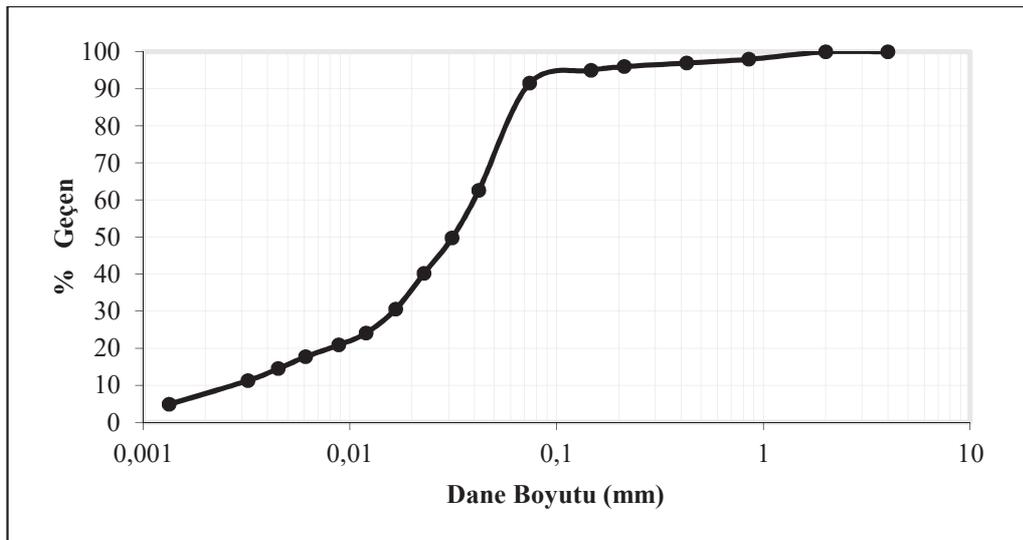
Şekil 4.9. Özgül ağırlık deneyi aşamaları

4.2.1.3. Elek analizi, hidromete ve pipet deneyleri

Bu çalışmada siltli zeminin dane çapı dağılımı, TS 1900-1/2006'ya göre yapılan elek analizi, hidromete ve pipet deneyleriyle belirlenmiştir (Şekil 4.10.). Yıkamalı elek analizi deneyi 75 µm'dan büyük danelerin dane çapı dağılımını, hidromete ve pipet deneyleri de 75 µm'dan küçük danelerin dane çapı dağılımını bulmak için yapılmıştır. Şekil 4.11.'de silt numunesinin dane dağılım eğrisi görülmektedir. Buna göre Tablo 4.2.'den de takip edilebileceği gibi deneylerde kullanılan zeminin %88,3'ü ince dane olup, kil oranı denenen farklı numunelerde %8 ile %11,7 arasında bulunmuştur.



Şekil 4.10. Dane çapı dağılımının bulunması, (a) hidrometre deneyi, (b) pipet deneyi, (c) elek analizi deneyi



Şekil 4.11. Silt zeminin dane dağılım eğrisi

4.3. Silt Zeminin Kimyasal Özellikleri

4.3.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM, Scanning Electron Microscope), bir elektron demetinin ilgilenilen örnek boyunca taranması ve bu örnekten saçılan elektronların algılanıp görüntü haline getirilmesi şeklinde uygulanan topoğrafik bir inceleme yöntemidir. İncelenen numunenin ilgili kısmının üç boyutlu görüntüsü elde edilebilmektedir.

Başka bir ifadeyle Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), yüksek çözünürlüklü görüntüler oluşturmak için, vakum ortamında oluşturulan ve aynı ortamda elektromanyetik lensler ile inceltilen elektron demeti ile incelenecek numuneyi analiz etmektedir. Mikroskop altında oluşturulan görüntüler, elektron ışınının numune ile olan etkileşiminden ortaya çıkan ışınlar veya geri yansıtılan elektronlar sayılarak oluşturulur.

Şekil 4.12.'de Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü bünyesinde kullanılan SEM görülmektedir.



Şekil 4.12. Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarındaki SEM

4.4. Doygun Olmayan Numunelerin Kompaksiyon ile Hazırlanması

Ralph Roscoe Proctor 1930'ların başlarında Los Angeles'da barajlarla ilgili çalışmalar yaptığı sırada sıkıştırmanın prensiplerini geliştirmiştir. Proktor'un geliştirdiği standart laboratuvar sıkıştırma deneyi Proctor deneyi olarak bilinmektedir. Kompaksiyon mekanik enerji uygulamak suretiyle zemin yoğunluğunun artırılması işlemidir. Kompaksiyonun amacı zemin kütlesinin mühendislik özelliklerini iyileştirmektir. Arazide sıkıştırma işlemi, tabaka tabaka serilen zeminin silindirme, titreşim uygulama veya tokmaktama gibi işlemler uygulanarak zeminin boşluk oranının azaltılması şeklinde gerçekleştirilir. Yol, hava alanı, toprak baraj, toprak dolgu vb. inşaatlarda, zemin belli bir kalınlıkta serilerek, belli bir su içeriğinde, uygun bir sıkıştırma aracı ile sıkıştırılır (Holtz ve Kovacs, 1981).

Bu çalışmada numuneler yukarıda belirtilen Standart Proktor deneyi enerjisi ile TS1900-1 uyarınca sıkıştırılmışlardır. Tamamı 2 mm'den küçük çaplı kuru numuneden 2000 gr'lık 5 adet numune tartılmış ve bunlar ayrı kaplara konulmak suretiyle üzerlerine 100 - 200 - 300 - 400 ve 500 ml su ilave edilmiştir. Homojen karışım sağlanana kadar karıştırma işlemi devam ettirilmiş ve su muhtevasının eşit dağılması için numuneler plastik poşetlere konularak bir gün bekletilmişlerdir.

Fiber katkılı zeminlerde ise, 2000 gr olarak hazırlanan farklı kaplardaki 5 numuneye her bir fiber boyu ve fiber oranı için öncelikle fiber katılmıştır. Örneğin 6 mm fiber boyu ve %1 fiber yüzdesi için $2000 \text{ gr} \times 1/100 = 20 \text{ gr}$ 6 mm'lik bazalt fiber 5 kaba da ayrı ayrı 20 gr olarak konulmuştur. Bazalt fiberler zemine mümkün olduğunca homojen şekilde karıştırılmaya çalışılmakta ancak dağılım sonuçta rastgele olmaktadır. Bunun öncesinde, yani bazalt fiber zemine karıştırılmadan önce bir elektrikli süpürge torbası içinde hava basıncına tabi tutularak birbirinden ayrılmaya çalışılmıştır. Ardından numunelere sırası ile 100 - 200 - 300 - 400 ve 500 ml olacak şekilde su ilave edilip karıştırılarak, numunenin her bölgesinin mümkün olduğunca nemli kalması sağlanmıştır, ardından su kaybı olmaması için sıkıca poşetlenmiştir (Şekil 4.13.).



Şekil 4.13. Silt, (a) kuru numune, (b) su ilave edilmesi, (c, d) fiber ilavesi, (e) poşetleme

Su muhtevası homojen olarak dağıldıktan sonra üç eksenli hücre kesme deneyi (UU) yapılacak numunelerin elde edilmesi için numuneler sıkıştırılmıştır.

Standart kompaksiyon uygulaması ile zemin metal silindirik kalıba 3 kademedeki sıkıştırılmış, her bir kademe için tokmakla 25 vuruş yapılmıştır. Vuruşlar öncelikle kalıbın karşılıklı 4 kenarında yapılmış, daha sonra saat yönünde dönülerek orta bölümlerin sıkışmasına da özen gösterilmiştir. 3 kademedeki gerçekleştirilen kompaksiyon tamamlandıktan sonra sıkıştırılmış zemin kalıp ile birlikte tartılmıştır. (Şekil 4.14.).



Şekil 4.14. Kompaksiyon uygulaması

4.4.1. Kompaksiyon deneyi hesaplamaları

Proktor deneyi için şunları söylemek mümkündür: maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası, kompaksiyon enerjisinin seviyesine bağlıdır. Kompaksiyon enerjisi arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlık artar ve optimum su muhtevası azalır. Kompaksiyon eğrisinin hiçbir kısmı, sıfır hava boşluğu çizgisinin sağ kısmına geçemez. Bu eğri bütün boşlukların suyla dolduğu γ_d 'nin teorik en büyük değeridir (γ_{zav}). Kompaksiyon sonrası maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası zeminden zemine değişiklik gösterir.

Herbir sıkıştırma işlemi sonunda sıkıştırılmış zeminin yaş birim hacim ağırlığı (γ_n), aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$\gamma_n (kN / m^3) = \frac{M_{(kalıp+zemin)} - M_{(kalıp)}}{V_{(kalıp)}} \times 9,81 \quad (4.1)$$

Zeminin kuru birim hacim ağırlığı (γ_k) aşağıdaki eşitlikten bulunur.

$$\gamma_k = \frac{\gamma_n}{1 + w} \quad (4.2)$$

Su muhtevası (w) da % cinsinden

$$w = \frac{M_{(kap+yaş)} - M_{(kap+kuru)}}{M_{(kap+kuru)} - M_{(kap)}} \cdot 100 \quad (4.3)$$

şeklinde hesaplanır. Sıfır hava boşluğu eğrisi de aşağıdaki denklem yardımıyla oluşturulur:

$$\gamma_{zav} (kN / m^3) = \frac{\rho_w}{\left(\frac{1}{G_s} + w \right)} \cdot 9,81 \quad (4.4)$$

ρ_w : Suyun yoğunluğu (1 g/cm³),

G_s : Özgül ağırlık,

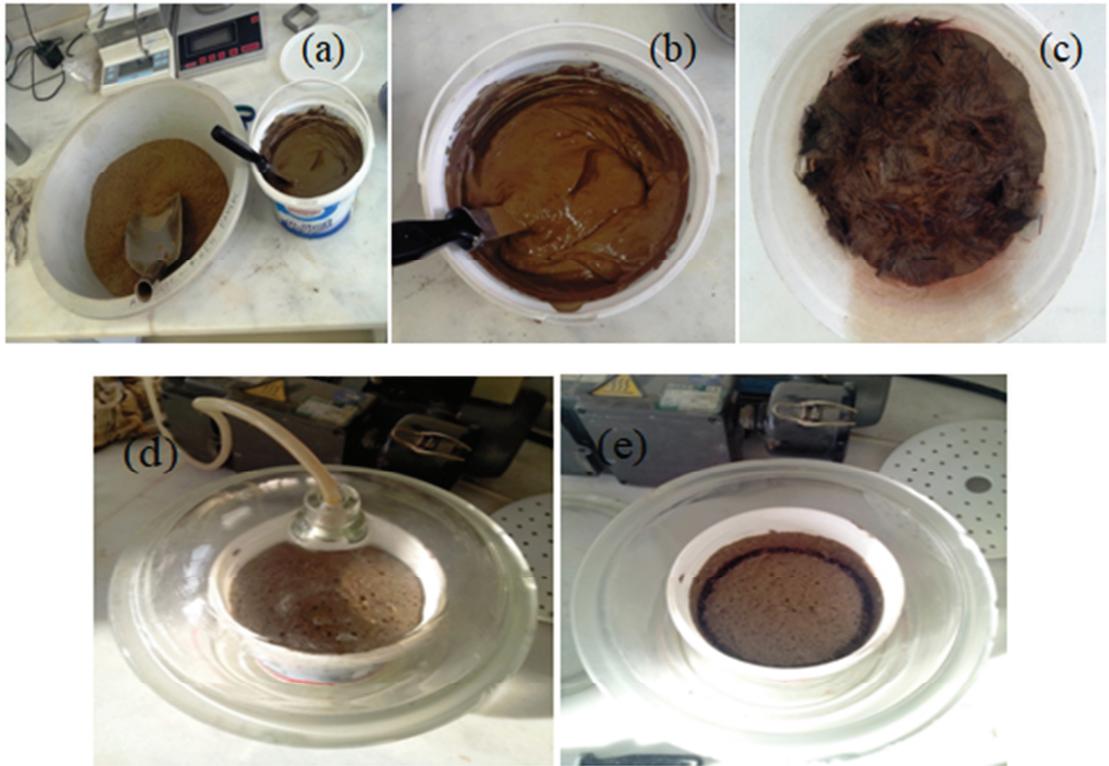
w : Su muhtevası.

4.5. Doygun Numunelerin Konsolide Edilerek Hazırlanması

Çalışmanın ikinci aşamasında doğal silt ve fiber katkılı silt numuneler farklı gerilmeler altında tek yönlü yükleme ile konsolide edilerek doymun numuneler elde edilmiştir. Her bir fiber boyu (6 mm - 12 mm ve 24 mm) ve fiber oranı (%1, %1,5 ve %2) için üç farklı konsolidasyon basıncı (100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa) uygulanmış

olup toplamda 30 adet konsolidasyon işlemi yürütülmüş ve sonuçta 120 adet doygun numune elde edilerek UU deneyine tabi tutulmuştur.

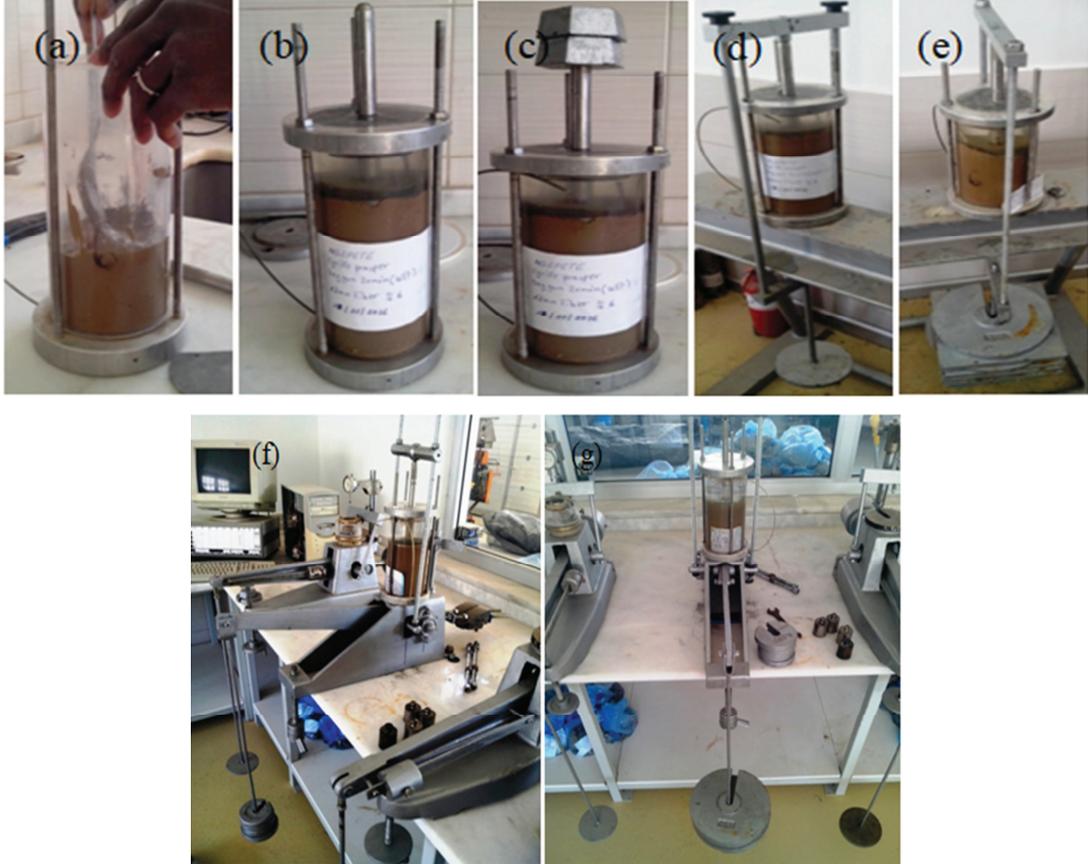
Numune hazırlama sürecinde öncelikle tüm numuneler, kuru numuneye su muhtevasını likit limitinin 1,5 katına çıkartacak kadar su eklenip karıştırılarak bulamaç haline getirilmiştir. Bunun için kuru olarak hazırlanmış olan her bir karışımdan 2 kg civarında alınarak 800 gr kadar su ilave edilmiş ve su muhtevasının numunenin her tarafında homojen hale gelmesi için bir müddet beklenmiştir. Sonrasında bulamaç içindeki hava kabarcıklarının çıkarılması için numune yaklaşık 2 saat boyunca desikatörde vakuma bırakılmıştır (Şekil 4.15.).



Şekil 4.15. Deney numunesinin bulamaç haline getirilmesi, (a,b) doğal zemin, (c) fiberli zemin, (d) bulamaç içindeki hava kabarcıklarının çıkarılması, (e) desikatörden çıkmış zemin

Daha sonrasında 10 cm çaplı hücrelere poroz taş ve filtre kağıdı konmasının ardından bulamaç haldeki numuneler 12 cm yüksekliğe gelene kadar kaşık yardımıyla serbestçe doldurulmuştur. Numune üzerine filtre kağıdı ve poroz taşı konulup, kurumayı engellemek için hücre ağzına kadar su ilave edilmiştir. En sonunda da

hücre kapatılarak yüklemeye hazır hale getirilmiş ve hücre üzerine 1 kg yük konulup 1 gün bekletilmiştir. Bir hafta süren yüklemeye düşey yük kademeli olarak artırılarak numuneler 100 kPa - 200 kPa ve 300 kPa gerilme altında tek yönlü konsolidasyona tabi tutulmuştur (Şekil 4.16.).



Şekil 4.16. Numune hazırlama ve yükleme

Konsolidasyon süreci tamamlanan hücre içindeki numunelere kriko yardımıyla 3,5 cm çaplı ince cidarlı silindirik çelik tüpler batırılarak herbirinden 4'er adet numune alınmıştır.

4.6. Konsolidasyonsuz Drenajsız Üç Eksenli Hücre Kesme Deneyleri (UU)

Üç eksenli hücre kesme deneyleri, deney başında numunenin konsolide edilip edilmemesine ve kesme aşamasında da drenaja müsaade edilip edilmemesine bağlı olarak farklı isimler alabilmektedir. Buna göre, UU konsolidasyonsuz drenajsız

(unconsolidated undrained), CU konsolidasyonlu drenajsız (consolidated undrained) ve CD de konsolidasyonlu drenajlı (consolidated drained) üç eksenli hücre kesme deneyini ifade etmektedir.

Bu çalışmada zeminin ani yükleme durumunda drenajsız kayma direnci parametrelerini bulmaya yarayan konsolidasyonsuz drenajsız (UU, unconsolidated undrained) tip deneyler yürütülmüştür. Deneyler, hem doygun hem de doygun olmayan zemin örnekleri için, TS1900-2'ye göre çevre basıncı 100 kPa'dan 400 kPa'a değiştirilerek yapılmıştır. Kullanılan UU deneyi sistemi ekipmanları Şekil 4.17.'de görüldüğü gibidir. Deney prosedürü Şekil 4.18.'den izlenebilir.

UU deneylerinin yapılabilmesi için kompaksiyonla sıkıştırılmış doygun olmayan veya konsolide edilerek hazırlanmış doygun numunelerin öncelikle içinde buldukları kalıplardan UU deney hücresine girecek boyutta numune elde edilebilen küçük çaplı çelik tüplere alınmaları gerekmektedir. Bunun için çapı 3,50 cm ve boyu 7,00 cm olan örselenmemiş numunelerin alınmasını sağlayan ince cidarlı çelik tüpler kullanılmıştır. 4 adet küçük çelik tüp presle büyük kalıbın içine itilerek numune ile doldurulmuşlar, sonrasında ise kriko yardımıyla dışarı alınmışlardır. Daha sonra ise herbir çelik tüp içindeki numune yüksekliği çapının yaklaşık iki katı olacak şekilde hazırlanarak çap ve boyu ölçülmüş ve tartılmışlardır. En son olarak da UU deney hücresine alınarak üç eksenli hücre kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir.



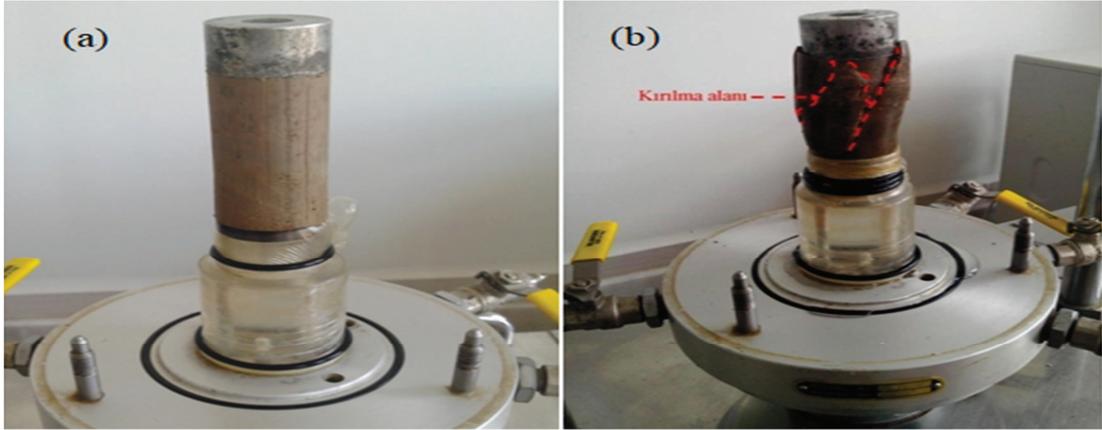
Şekil 4.17. UU deney sistemi ekipmanları



Şeki 4.18. Üç eksenli hücre kesme deneyi aşamaları, (a, b) doymun ve doymun olmayan numunelerin büyük kriko ile küçük tüplere alınması, (c, d, e) numunelerin küçük tüplerden çıkarılması, (f) numunelerin tartılması, (g, h) numunelerin boyu ve çapının ölçülmesi, (i) lastik membran yerleştirilmesi, (j) deformasyon ölçüm mekanizmasının oturtulması, (k) çevre basıncının ayarlanması, (l) okuma

Hücreye yerleştirilen numunelere başlık konulduktan sonra kılıf geçirilerek su etkisinden korunması sağlanmıştır. Sonrasında hücre kapatılıp içi su ile doldurulmuş ve ilgili hücre basıncı uygulanmıştır. Bundan sonra deney başlatılarak 0,8 mm/dak gibi sabit bir kesme hızı ile numune üzerine yük uygulanmıştır. Deney belli aralıklarda boy değişimi ve kuvvet değerleri okunarak yenilme gerçekleşinceye veya %20 boy değişimine kadar devam ettirilmiştir. Deney bitiminde numuneler su muhtevası ölçümü için kurutulmak üzere etüve konulmuşlardır.

Şekil 4.19.'da bir numunenin deney öncesi hali ve deney sonrasında kesilmiş hali görülmektedir.



Şekil 4.19. Deney numunesi, (a) deneyden önce, (b) deneyden sonra

4.6.1. Üç eksenli hücre kesme deneyi (UU) hesaplamaları

Numunenin ilk alanı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$A_0 = \frac{\pi \times D^2}{4} \quad (4.5)$$

İlerleyen okumalarla birlikte her bir kademe için düşey şekil değiştirme şu şekilde hesaplanır:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4.6)$$

Pistonun uyguladığı yük kuvvet halkası kullanılırsa:

$$P = \text{Kuvvet halkası okuması} * \text{Kuvvet halkası katsayısı} \quad (4.7)$$

şeklinde, düzeltilmiş alan:

$$A_0 = \frac{A_0}{1 - \varepsilon} \quad (4.8)$$

eşitliğiyle ve her aşamadaki gerilme (σ)

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.9)$$

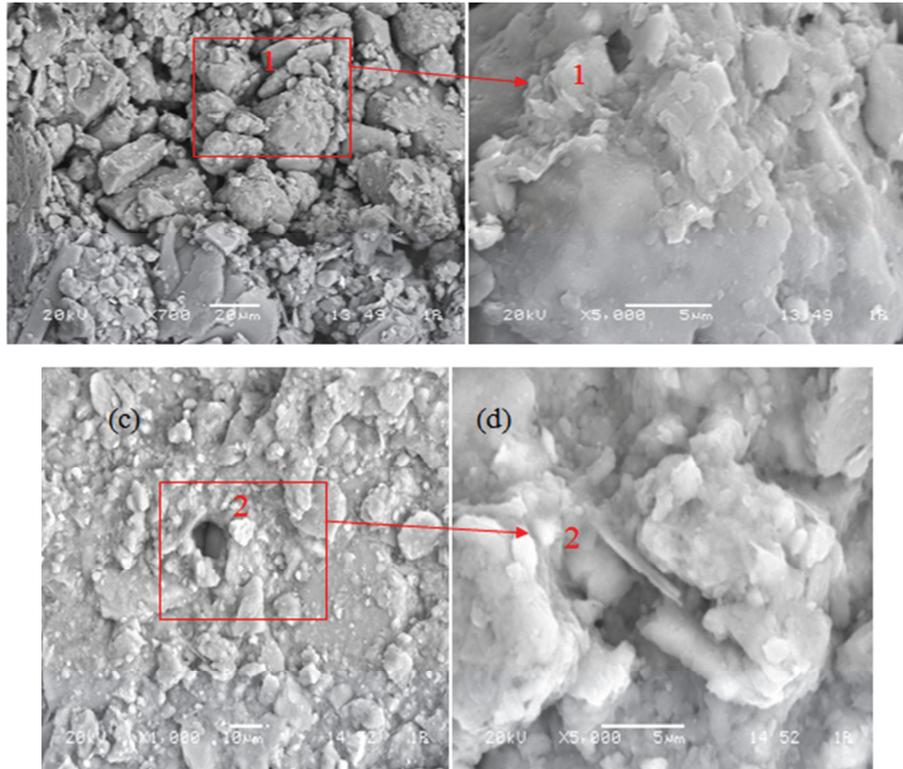
eşitliği ile hesaplanır.

BÖLÜM 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, silt zeminin doymun ve doymun olmayan numunelerinin drenajsız kayma dirençlerine bazalt fiber katkısının iyileştirici etkisi Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri ve üç eksenli hücre kesme deneyi sonuçları ışığında irdelenmiştir.

5.1. Siltin ve Bazalt Fiberin Mineral ve Mikro Yapı Özellikleri

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi ile silt zemini ve bazalt fiberleri oluşturan yapı ve mineraller ortaya konmuştur. Şekil 5.1.'de silt zemin örneklerinin farklı çözünürlüklerde mikroskobik yapısı görülmektedir. Tablo 5.1.'de ise silt zeminin mineral içeriği sunulmaktadır.

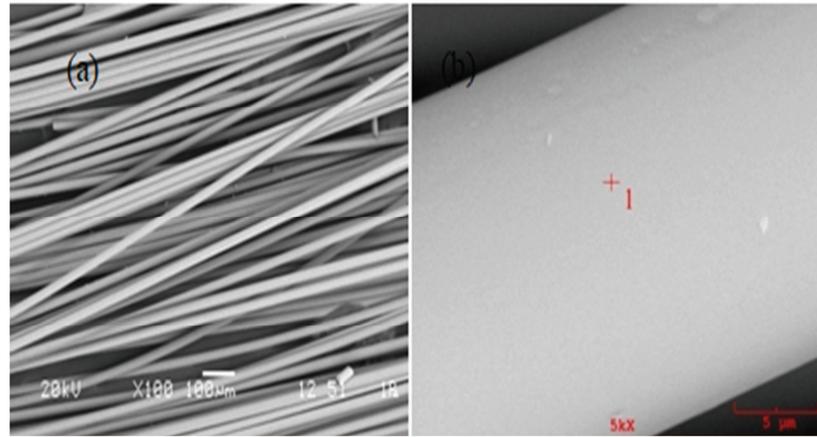


Şekil 5.1. SEM analizi: silt zemin mikro yapısı (a) X700, (b) X5000, (c) X1000, (d) X5000

Tablo 5.1. Silt zemini oluşturan mineraller (SEM)

Element	Yoğunluk (c/s)	Ağırlıkça (%)
O	74,84	43,183
Na	1,85	0,406
Mg	15,92	2,389
Al	74,68	9,841
Si	217,55	28,67
K	19,04	2,64
Ca	56,85	8,111
Fe	18,07	4,761
Toplam	460,73	100,00

Şekil 5.2.'de bazalt fiberlerin farklı çözünürlüklerde mikroskobik yapısı gösterilmektedir. Bazalt fiberlerin mineralojik bileşimi de Tablo 5.2.'den izlenebilir.



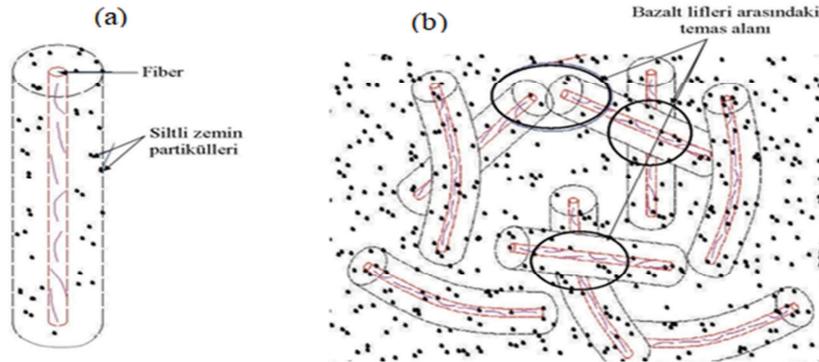
Şekil 5.2. SEM analizi: bazalt fiber mikro yapısı (a) X100, (b) X5000

Tablo 5.2. Bazalt fiberi oluşturan mineraller (SEM)

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

5.2. Silt - Fiber Karışımlarının Mikro Yapı Özellikleri

Bazalt liflerin doymuş ve doymuş olmayan siltli numunelerin mekanik davranışı üzerindeki etkilerini belirleyebilmek için, bazalt fiberlerle numune partiküllerinin etkileşimi Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Analizler, hem doğal numuneler hem de bazalt fiber takviyeli olanlar üzerinde yürütülmüştür. Bazalt fiber - zemin etkileşimi Gao vd. (2015) tarafından ortaya konan ve Şekil 5.3.'te gösterilmiş olan modelle açıklanabilir. Buna göre bazalt fiber takviyeli zeminlerde fiberler ve zemin partikülleri birbirleriyle etkileşim kurar ve birbirlerini sınırlarlar. Aşağıda da açıklanacağı üzere sonuçlar, bazalt fiberin belirli bir oranı ve uzunluğunun silt numunenin drenajsız kayma direncini önemli ölçüde iyileştirebildiğini göstermektedir. Bazalt fiber ile güçlendirilmiş silt zeminin, deformasyon ve kırılma özellikleri açısından orijinal haline göre son derece güçlü özelliklere sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Bazalt fiberin zemin partikülleri ile etkileşim modları ve güçlendirme mekanizması aşağıdaki şekilde tartışılabilir.



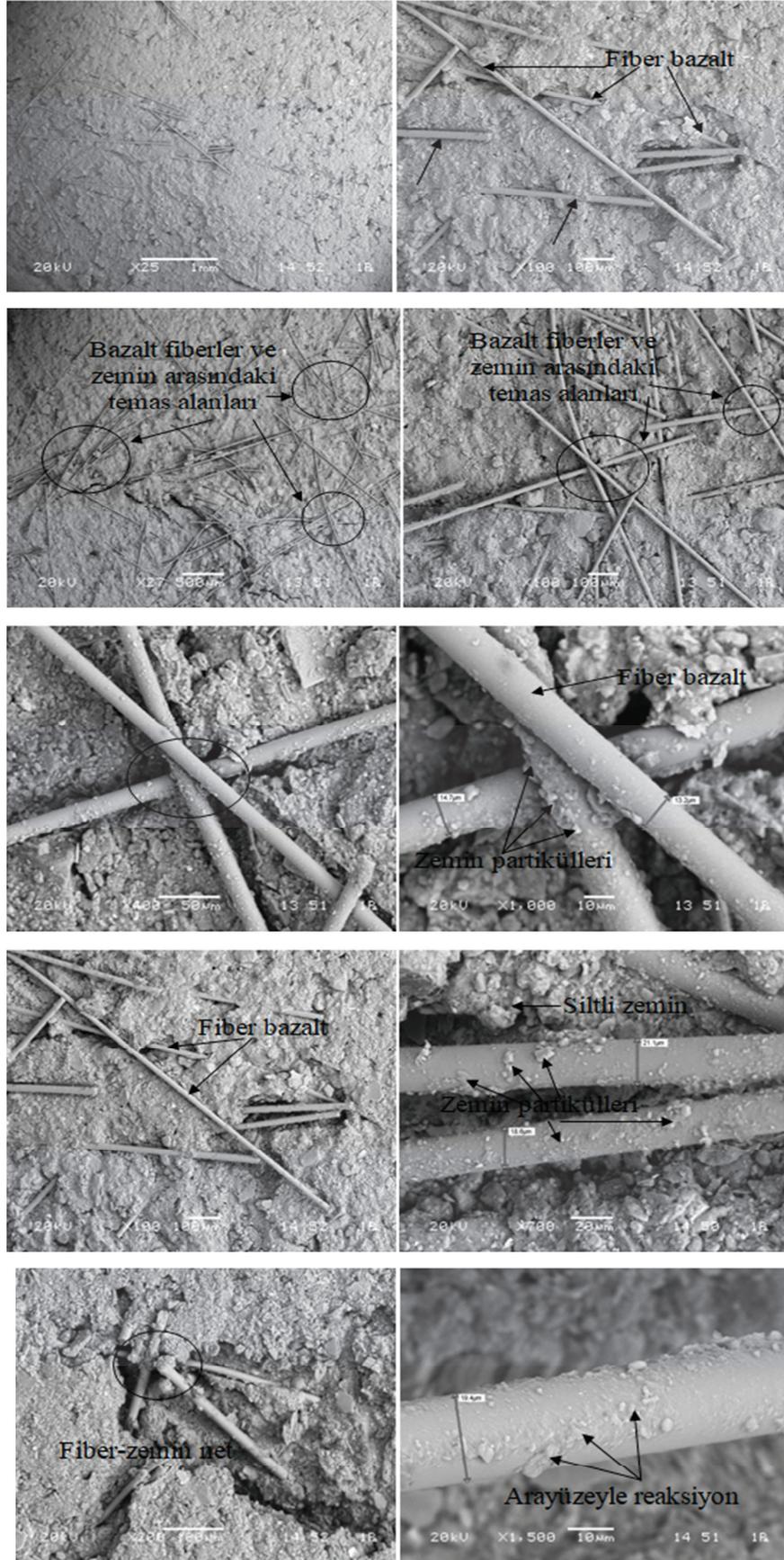
Şekil 5.3. Fiber ve zemin kolon-ağ modeli, (a) bazalt fiber ve partiküller, (b) lifler ve partiküller arasındaki etkileşim (Gao vd., 2015)

Bazalt fiber yüzdesi silt zeminin drenajsız kayma direnci üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Bazalt fiber oranı oldukça az olduğunda, fiberler arasındaki mesafe büyüktür, fiber-zemin kolonları ve zemin daneleri verimli bir fiber-zemin ağı oluşturamaz. Zemin dış kuvvete maruz kaldığında, kuvvet dağınık fiber-zemin kolonları ve zemin partikülleri arasında aktarılır. Bazalt fiber içeriği giderek arttığında, fiber aralığı azalmakta, böylece bitişik fiber-zemin kolonları etkili bir fiber-zemin ağı oluşturmak üzere kolayca kesişmektedir. Bu durumda zemin bir dış

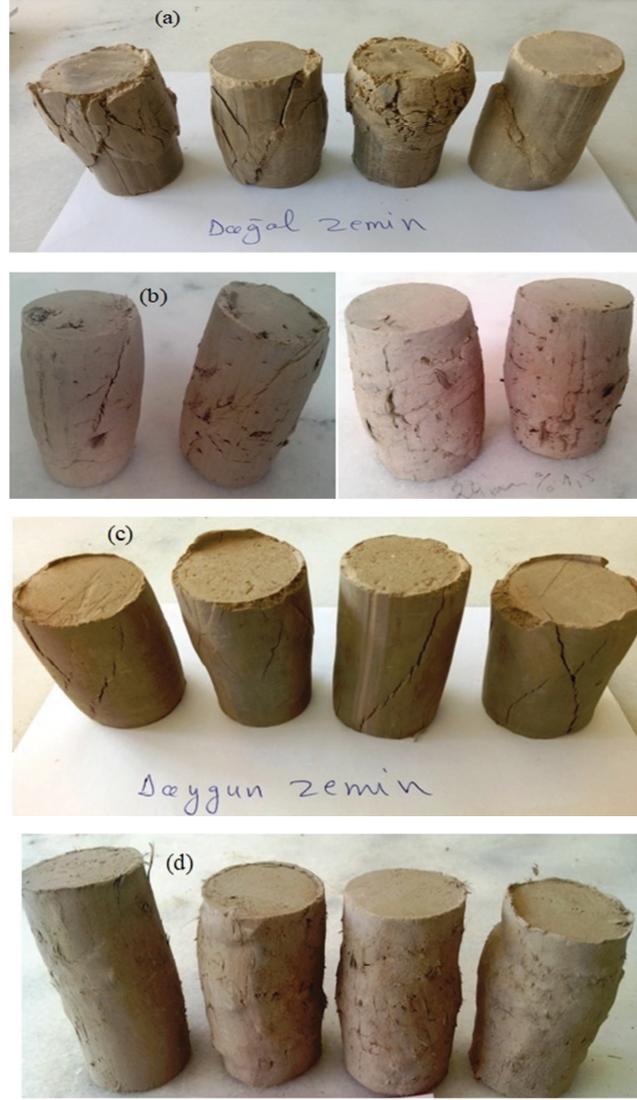
kuvvete tabi tutulduğunda, bir bütün olarak hareket eden zemin ve fiber iskeleti nedeniyle, kuvvet fiber-zemin ağı ve zemin partikülleri arasında kolayca transfer edilmektedir. Bununla birlikte, bazalt fiber oranı optimum değeri aştığında, deney sonuçları iyileştirme etkisinin daha iyi olmadığını göstermektedir. Bazalt fiber içeriği oldukça fazla olduğunda, fiberler zemin içinde kümeler halinde toplanmakta ve bu da fiberlerin eşit dağılımını zorlaştırmaktadır. Bu da, fiber takviyesinin zemin üzerindeki etkisini azaltmaktadır. Bazalt fiber oranı yanında fiber uzunluğunun da iyileştirme miktarında çok önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Bazalt fiberler çok kısa olduğunda, numune içinde oluşan fiber-zemin kolonları da çok kısa kalmaktadır. Çevredeki zemin partiküllerinin neden olduğu yanal gerilmeler oldukça küçüktür ve bu da fiberlerin tamamının sınırlandırılmasını zorlaştırmaktadır. Zemin-fiber kolonları arasındaki temas düşük olup gerilme iletimi zorlaşmakta ve fiber-zemin ağı etkili bir şekilde oluşturulamadığından bazalt fiberler ile zemin partikülleri arasında kolayca kayma gerçekleşebilmektedir. Bu nedenle, iyileştirme etkisini etkili bir şekilde görmek zor olmaktadır. Buna göre fibersiz zemine kıyasla, güçlendirilmiş zeminin mukavemeti pek fazla artmamaktadır. Bununla birlikte, optimum bazalt fiber oranı belirlendiğinde, bazalt fiberlerinin uzunluğu arttıkça fiberler ve zemin partikülleri arasındaki temas alanı artmakta, fiber-zemin ağı daha etkili bir şekilde oluşturulabildiğinden gerilmelerin iletilmesi kolaylaşmaktadır (Şekil 5.4.). Gao vd. (2015) çalışmalarında, bazalt fiber boyunun aşırı uzun olması durumunda fiberlerin sürekli eğilme etkisinde olduğunu, bu nedenle de dayanımın düşebileceğini belirtmektedirler.

5.3. UU Deneyinde Makroskopik Davranış

UU deneylerinden sonra numunelerin davranışlarındaki farklılıkları gözlemlemek mümkün olmaktadır. Doygun olmayan durumda katkısız ve katkılı numunelerde gevrek kırılmaya işaret eden kayma yüzeyleri görülmüştür (Şekil 5.5.a ve b.). Doygun numunelerde katkısız olanların bir kısmında kayma yüzeyleri görülürken (Şekil 5.5.c.), bazalt fiber katkılı numunelerde ise dayanım artışı deformasyonla birlikte devam ederken hiç bir kırılma yüzeyi gelişmemiştir (Şekil 5.5.d.). Şekil 5.6.'da tüm numunelerin görüntüsü sunulmaktadır.



Şekil 5.4. Fiber - silt karışımının SEM mikrografisi



Şekil 5.5. UU deneyleri sonrası numuneler, (a) doğun olmayan doğal zemin, (b) doğun olmayan fiberli zemin, (c) doğun doğal zemin, (d) doğun fiberli zemin



Şekil 5.6. UU deneyleri sonrası bütün zemin örnekleri

5.4. Üç Eksenli Hücre Kesme Deneyi (UU) Sonuç Özeti

Siltli zeminlerin UU deneyinden elde edilen deviatör gerilme değerleri ve dayanımda artış oranları Tablo 5.3. ve Tablo 5.4'te sunulmaktadır.

Tablo 5.3. Doymun olmayan numunelerin dayanımlarında bazalt fiber katkısı ile artış oranları

Su miktarı (ml)	Fiber boyu (mm)	Fiber oranı (%)	σ_3 : 100 kPa		σ_3 : 200 kPa		σ_3 : 300 kPa		σ_3 : 400 kPa	
			$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)	Dayanım artışı (%)	$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)	Dayanım artışı (%)	$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)	Dayanım artışı (%)	$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)	Dayanım artışı (%)
100	0	0	446	0	751	0	964	0	1125	0
	6	1	613	37,44	880	17,18	1165	20,85	1281	13,87
	6	1,5	781	75,11	1183	57,52	1297	34,54	1456	29,42
	6	2	697	56,28	908	20,91	1023	6,12	1348	19,82
	12	1	719	61,21	989	31,69	1405	45,75	1556	38,31
	12	1,5	901	102,02	1217	62,05	1361	41,18	1632	45,07
	12	2	716	60,54	902	20,11	1055	9,44	1381	22,76
	24	1	795	78,25	1028	36,88	1293	34,13	1459	29,69
	24	1,5	913	104,71	1180	57,12	1453	50,73	1636	45,42
	24	2	740	65,92	1074	43,01	1376	42,74	1515	34,67
200	0	0	432	0	625	0	825	0	1127	0
	6	1	537	24,31	884	41,44	1120	35,76	1290	14,46
	6	1,5	648	50,00	858	37,28	1200	45,45	1406	24,76
	6	2	591	36,81	839	34,24	982	19,03	1366	21,21
	12	1	520	20,37	914	46,24	1103	33,7	1434	27,24
	12	1,5	726	68,06	1013	62,08	1248	51,27	1429	26,8
	12	2	562	30,09	814	30,24	996	20,73	1468	30,26
	24	1	679	57,18	955	52,80	1181	43,15	1386	22,98
	24	1,5	830	92,13	1020	63,20	1257	52,36	1538	36,47
	24	2	857	98,38	979	56,64	1089	32,00	1505	33,54
300	0	0	410	0	647	0	775	0	861	0
	6	1	440	7,32	689	6,49	937	20,9	1145	32,98
	6	1,5	496	20,98	797	23,18	1005	29,68	1274	47,97
	6	2	437	6,59	791	22,26	1001	29,16	1195	38,79
	12	1	441	7,56	719	11,13	952	22,84	1216	41,23
	12	1,5	498	21,46	817	26,28	1080	39,35	1370	59,12
	12	2	448	9,27	801	23,8	993	28,13	1174	36,35
	24	1	474	15,61	773	19,47	991	27,87	1251	45,30
	24	1,5	656	60,00	934	44,36	1137	46,71	1384	60,74
	24	2	630	53,66	886	36,94	986	27,23	1371	59,23

Tablo 5.3. (Devamı)

Su miktarı (ml)	Fiber boyu (mm)	Fiber oranı (%)	σ_3 : 100 kPa		σ_3 : 200 kPa		σ_3 : 300 kPa		σ_3 : 400 kPa	
			$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)	Dayanım artışı (%)	$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)	Dayanım artışı (%)	$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)	Dayanım artışı (%)	$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)	Dayanım artışı (%)
400	0	0	173	0	257	0	369	0	450	0
	6	1	213	23,12	321	24,9	429	16,26	476	5,78
	6	1,5	314	81,5	439	70,82	574	55,56	734	63,11
	6	2	290	67,63	346	34,63	496	34,42	633	40,67
	12	1	270	56,07	369	43,58	487	31,98	519	15,33
	12	1,5	363	109,83	492	91,44	582	57,72	746	65,78
	12	2	327	89,02	426	65,76	526	42,55	655	45,56
	24	1	264	52,6	425	65,37	529	43,36	637	41,56
	24	1,5	450	160,12	536	108,56	640	73,44	819	82,00
	24	2	384	121,97	433	68,48	569	54,2	695	54,44
500	0	0	53	0	72	0	83	0	96	0
	6	1	55	3,77	74	2,78	86	3,61	105	9,38
	6	1,5	78	47,17	97	34,72	117	40,96	140	45,83
	6	2	65	22,64	81	12,50	100	20,48	120	25,00
	12	1	74	39,62	90	25,00	117	40,96	145	51,04
	12	1,5	97	83,02	145	101,39	167	101,2	184	91,67
	12	2	86	62,26	109	51,39	126	51,81	147	53,13
	24	1	70	32,08	91	26,39	108	30,12	122	27,08
	24	1,5	89	67,92	115	59,72	129	55,42	162	68,75
	24	2	113	113,21	135	87,50	150	80,72	179	86,46

Tablo 5.3.'teki değerler doymun olmayan numuneler, Tablo 5.4.'teki değerler ise doymun numuneler üzerinde yürütülen deneylerden elde edilen sonuçları göstermektedir. Bu sonuçlar, bazalt fiberin farklı uzunluk ve oranda kullanılmasıyla siltli numunelerin drenajsız kayma dirençlerinin iyileştirilebileceğini ortaya koymaktadır. Buna göre en yüksek artış oranı doymun olmayan numunelerde %160,12, doymun numunelerde ise %88,63 değerlerine ulaşmıştır. Doymun olmayan zeminlerde su muhtevasının ve çevre basıncının düşük değerlerinde artış daha yüksek olurken artan su muhtevası değerlerinde dirençlerdeki artışlar arasındaki farklar azalmıştır. Doymun zemin örneklerinde de benzer şekilde düşük çevre basınçlarında dirençteki artış daha belirgin olarak ortaya çıkmıştır. En düşük artışlar ise doymun olmayan numunelerde %2,78 ve doymun numunelerde %2,66 olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 5.4. Doygun numunelerin dayanımlarında bazalt fiber katkısı ile artış oranları

Düşey gerilme (kPa)	Fiber boyu (mm)	Fiber oranı (%)	σ_3 : 100 kPa		σ_3 : 200 kPa		σ_3 : 300 kPa		σ_3 : 400 kPa	
			$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)	Dayanım artışı (%)	$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)	Dayanım artışı (%)	$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)	Dayanım artışı (%)	$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)	Dayanım artışı (%)
100	0	0	43,41	0	47,17	0	49,08	0	52,67	0
	6	1	47,14	8,58	48,42	2,66	51,58	5,09	57,28	8,75
	6	1,5	64,47	48,51	72,38	53,46	78,48	59,89	81,45	54,64
	6	2	50,93	17,32	61,92	31,28	71,58	45,83	75,39	43,14
	12	1	50,97	17,41	54,05	14,60	57,60	17,35	59,97	13,86
	12	1,5	68,58	57,97	78,03	65,44	85,79	74,78	89,63	70,18
	12	2	54,19	24,83	60,60	28,48	64,81	32,04	69,05	31,10
	24	1	53,61	23,49	59,31	25,75	63,45	29,27	67,02	27,25
	24	1,5	75,64	74,24	82,46	74,83	91,16	85,72	99,35	88,63
	24	2	65,95	51,92	71,80	52,23	81,26	65,55	90,16	71,18
200	0	0	97,85	0	103,04	0	108,53	0	117,25	0
	6	1	102,10	4,35	109,74	6,50	115,58	6,50	123,98	5,74
	6	1,5	119,80	22,43	128,57	24,78	140,26	29,23	147,18	25,53
	6	2	114,77	17,29	123,37	19,73	128,85	18,72	140,50	19,83
	12	1	119,74	22,38	128,76	24,96	136,34	25,63	142,75	21,75
	12	1,5	131,48	34,37	138,93	34,84	150,27	38,46	159,16	35,75
	12	2	117,92	20,51	125,27	21,58	129,72	19,52	132,79	13,26
	24	1	126,28	29,06	139,90	35,77	145,51	34,08	156,44	33,43
	24	1,5	139,66	42,74	147,44	43,09	151,59	39,68	161,68	37,90
	24	2	130,46	33,33	140,77	36,62	147,19	35,62	160	36,47
300	0	0	99,62	0	111,74	0	122,70	0	132,19	0
	6	1	136,92	37,44	149,39	33,69	161,16	31,34	168,09	27,16
	6	1,5	141,09	41,63	166,54	49,04	174,70	42,38	188,68	42,73
	6	2	139,50	40,03	164	46,77	173,87	41,71	177,29	34,12
	12	1	146,05	46,61	153,61	37,48	165,30	34,72	175,23	32,56
	12	1,5	171,44	72,10	175,85	57,37	179,80	46,54	192,96	45,97
	12	2	152,28	52,86	162,51	45,44	176,99	44,25	172,79	30,71
	24	1	153,88	54,47	160,89	43,99	171,58	39,84	182,31	37,92
	24	1,5	163,08	63,70	177,20	58,58	181,16	47,65	193,01	46,01
	24	2	156,40	57	167,81	50,18	173,95	41,77	183,88	39,10

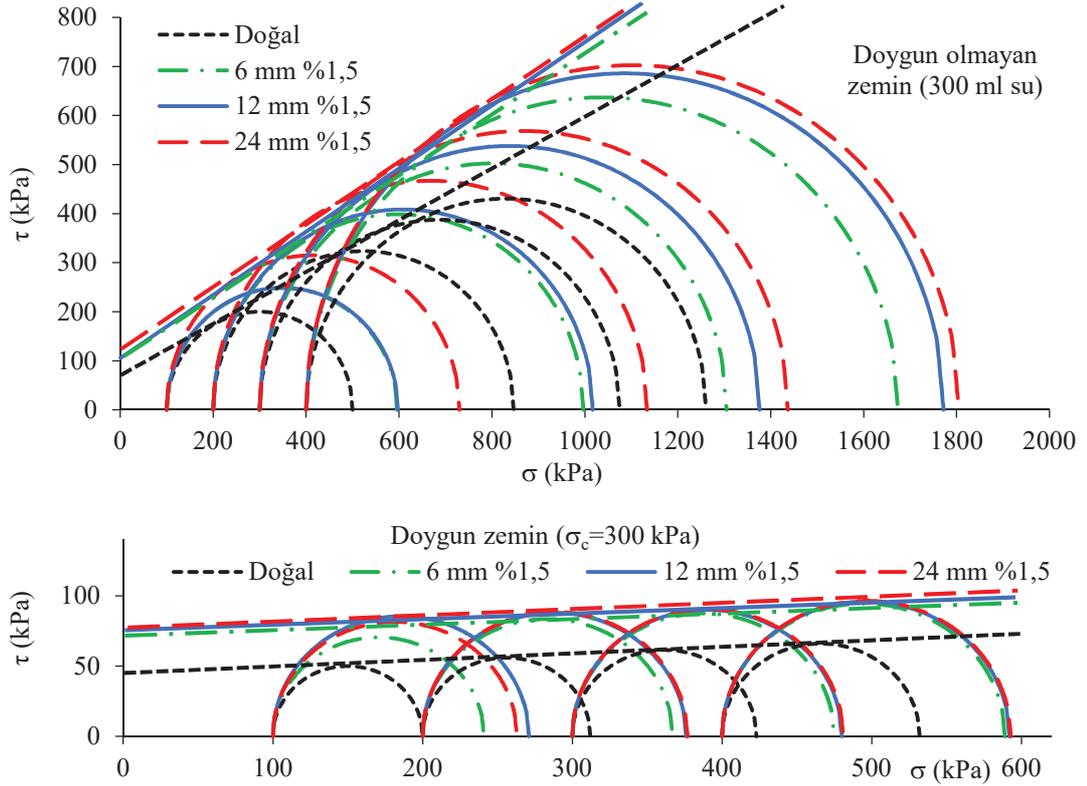
5.4.1. Doymun olmayan ve doymun numunelerin dayanımlarında bazalt fiber katkısı ile artış oranları

Doymun olmayan zemin numuneleri üzerinde yürütölen 200 adet UU deneyinde elde edilen deviatör gerilme ve dayanımda artış oranları değeri Tablo 5.3.'te özetlenmektedir. İlk bakışta bazalt fiber boyu ve karışımındaki bazalt fiber oranı farketmeksizin dayanımların denenen tüm örneklerde arttığı görölmektedir. En düşük dayanım artışları 6 mm boylu bazalt fiberin silte %1 oranında ilave edildiği durumlarda oluşurken, en yüksek dayanım artışlarının 24 mm fiberin %1,5 oranında ilavesi ile gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Örnekle doymun olmayan zeminde kuru numuneye 100 ml su ilave edilerek hazırlanan numunelerde çevre basıncının 100 kPa olduğu durumda 6 mm boylu fiberin %1,5 oranında ilavesi ile dayanım %75,11 artarken, artış 12 mm boylu fiberlerin %1,5 oranında ilavesi ile %102,02 ve 24 mm boylu fiberin %1,5 oranında ilavesi ile %104,71'lere çıkmıştır. Diğer bir konfigürasyonda kuru numuneye 400 ml su ilave edilerek hazırlanan numunelerde çevre basıncının 400 kPa olduğu durumda 6 mm boylu fiberin %1,5 oranında ilavesi ile dayanım %63,11 artarken, artış 12 mm boylu fiberlerin %1,5 oranında ilavesi ile %65,78 ve 24 mm boylu fiberin %1,5 oranında ilavesi ile %82,00'lere çıkmıştır.

Doymun zemin numuneleri üzerinde yürütölen 120 adet UU deneyinde elde edilen sonuçlar Tablo 5.4.'te özetlenmektedir. Burada da bazalt fiber boyu ve karışımındaki bazalt fiber oranı farketmeksizin dayanımların denenen tüm örneklerde arttığı görölmektedir. En düşük dayanım artışları 6 mm boylu bazalt fiberin silte %1 oranında ilave edildiği durumlarda oluşurken, en yüksek dayanım artışlarının 24 mm fiberin %1,5 oranında ilavesi ile gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Örnekle tek ekseninde konsolidasyon basıncının 100 kPa olduğu doymun zemin numunelerinde çevre basıncının 100 kPa olduğu durumda 6 mm boylu fiberin %1,5 oranında ilavesi ile dayanım %48,51 artarken, artış 12 mm boylu fiberlerin %1,5 oranında ilavesi ile %57,97 ve 24 mm boylu fiberin %1,5 oranında ilavesi ile %74,24'lere çıkmıştır. Diğer bir örnekte tek ekseninde konsolidasyon basıncının 300 kPa olduğu doymun zemin numunelerinde çevre basıncının 400 kPa olduğu durumda 6 mm boylu fiberin %1,5 oranında ilavesi ile dayanım %42,73 artarken, artış 12 mm boylu fiberlerin

%1,5 oranında ilavesi ile %45,97 ve 24 mm boylu fiberin %1,5 oranında ilavesi ile %46,01'lere çıkmıştır.

Şekil 5.7.'de doymun olmayan ve doymun numunelerde kayma direncinin değişimi sunulmaktadır. Bazalt fiber katkısının tüm kombinasyonları için silt zeminin doymun olup olmaması farketmeden drenajsız kayma direncinin arttığı görülmektedir.



Şekil 5.7. Doymun olmayan (a) ve doymun numunelerde (b) kayma direnci

5.4.2. Doymun olmayan ve doymun numunelerde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi

Deneylerden elde edilen maksimum deviyatör gerilme ve kırılmada boy değişimi değerleri Tablo 5.5. ve Tablo 5.6.'da verilmiştir. Tablo 5.5.'de doymun olmayan numuneler için kırılmada boy değişimlerine bakılırsa fiber katkısının numunelere esneklik kazandırdığı görülebilir. Örnekle doymun olmayan zeminde kuru numuneye 100 ml su ilave edilerek hazırlanan numunelerde çevre basıncının 200 kPa olduğu durumda kırılmada birim boy değişimleri doğal numune için %4,23, 6 mm boylu fiberin %1,5 oranında ilavesi durumunda %5,63, 12 mm boylu fiberlerin %1,5

Tablo 5.5. Doygun olmayan numunelerde maksimum deviatör gerilme ve kırılmada boy değişimi değerleri

Su miktarı (ml)	Fiber boyu (mm)	Fiber oranı (%)	σ_3 : 100 kPa		σ_3 : 200 kPa		σ_3 : 300 kPa		σ_3 : 400 kPa	
			$\epsilon_{kırılma}$ (%)	$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)	$\epsilon_{kırılma}$ (%)	$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)	$\epsilon_{kırılma}$ (%)	$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)	$\epsilon_{kırılma}$ (%)	$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)
100	0	0	2,11	446	4,23	751	7,07	964	11,27	1125
	6	1	12,64	613	11,43	880	11,11	1165	11,11	1281
	6	1,5	8,45	781	5,63	1183	11,28	1297	14,08	1456
	6	2	8,33	697	12,50	908	11,11	1023	15,28	1348
	12	1	8,33	719	9,72	989	4,16	1405	5,59	1556
	12	1,5	9,75	901	9,80	1217	11,27	1361	12,50	1632
	12	2	13,87	716	13,89	902	16,76	1055	13,87	1381
	24	1	4,19	795	6,94	1028	8,32	1293	11,11	1459
	24	1,5	15,28	913	12,69	1180	10,00	1453	9,86	1636
	24	2	15,38	740	11,11	1074	9,75	1376	11,11	1515
200	0	0	5,66	432	6,94	625	11,27	825	8,33	1127
	6	1	4,23	537	2,80	884	9,86	1120	11,27	1290
	6	1,5	6,94	648	8,33	858	6,94	1200	8,33	1406
	6	2	4,23	591	7,05	839	9,74	982	8,45	1366
	12	1	18,03	520	6,94	914	6,93	1103	11,11	1434
	12	1,5	9,7	726	11,09	1013	6,95	1248	8,33	1429
	12	2	5,55	562	13,89	814	18,13	996	8,33	1468
	24	1	4,16	679	5,56	955	9,72	1181	11,11	1386
	24	1,5	16,69	830	18,05	1020	11,27	1257	11,27	1538
	24	2	5,57	857	8,33	979	16,67	1089	6,94	1505
300	0	0	5,63	410	8,45	647	8,46	775	4,23	861
	6	1	8,45	440	11,11	689	9,86	937	11,19	1145
	6	1,5	8,33	496	9,72	797	12,50	1005	12,50	1274
	6	2	5,63	437	5,63	791	8,39	1001	6,97	1195
	12	1	16,78	441	13,99	719	15,27	952	11,11	1216
	12	1,5	18,18	498	12,86	817	12,68	1080	9,72	1370
	12	2	16,67	448	8,32	801	13,89	993	13,91	1174
	24	1	8,39	474	11,11	773	12,50	991	12,50	1251
	24	1,5	18,31	656	13,87	934	13,89	1137	13,89	1384
	24	2	6,94	630	8,33	886	13,99	986	6,94	1371

Tablo 5.5. (devamı)

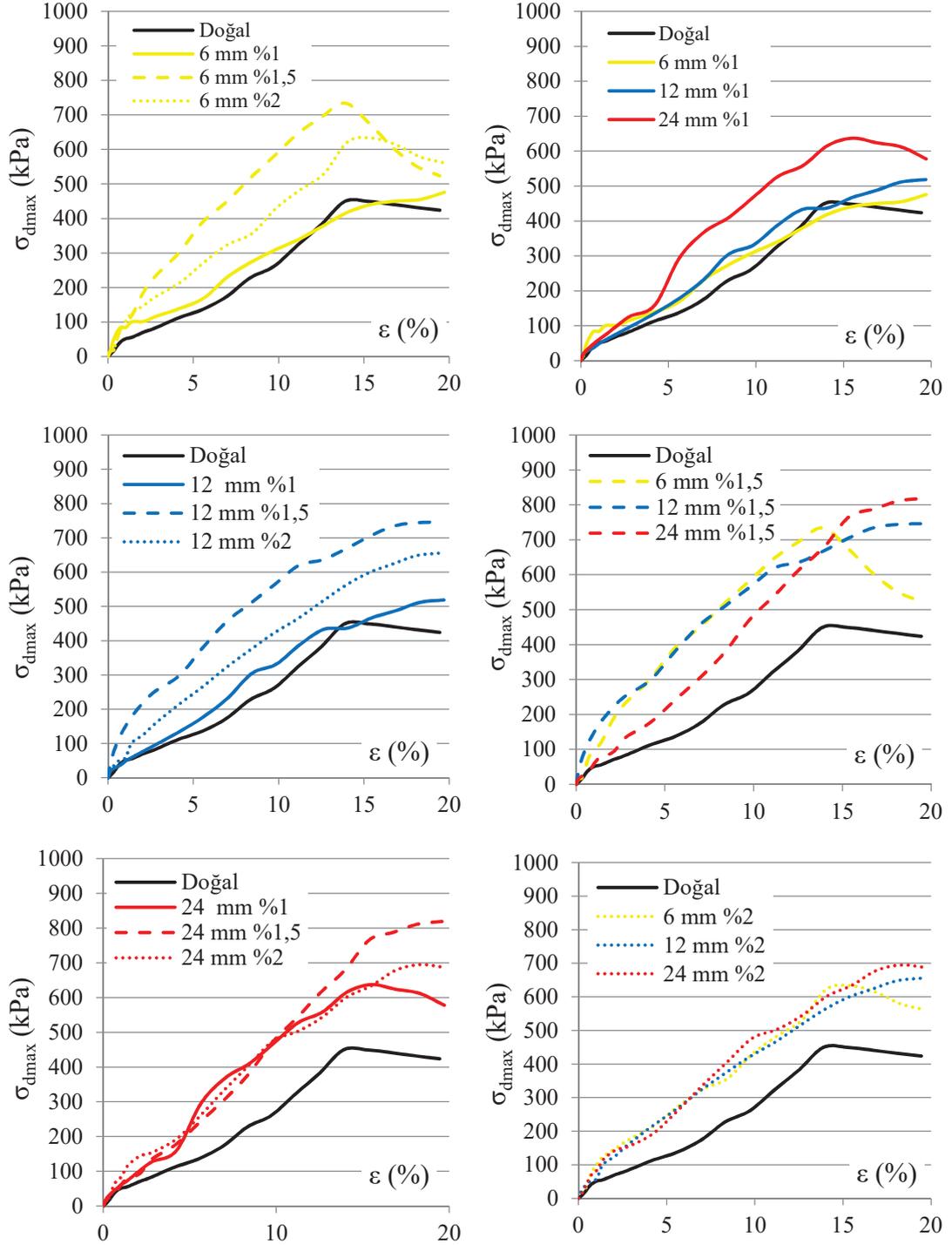
Su miktarı (ml)	Fiber boyu (mm)	Fiber oranı (%)	σ_3 : 100 kPa		σ_3 : 200 kPa		σ_3 : 300 kPa		σ_3 : 400 kPa	
			$\epsilon_{kırılma}$ (%)	$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)	$\epsilon_{kırılma}$ (%)	$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)	$\epsilon_{kırılma}$ (%)	$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)	$\epsilon_{kırılma}$ (%)	$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)
400	0	0	16,67	173	19,44	257	19,44	369	13,89	450
	6	1	17,14	213	16,90	321	17,14	429	19,72	476
	6	1,5	18,31	314	19,44	439	15,49	574	13,89	734
	6	2	15,45	290	16,88	346	16,88	496	15,47	633
	12	1	16,90	270	15,38	369	19,66	487	19,69	519
	12	1,5	18,05	363	19,58	492	19,44	582	19,58	746
	12	2	19,72	327	16,78	426	19,44	526	19,44	655
	24	1	18,31	264	15,38	425	15,49	529	15,49	637
	24	1,5	19,58	450	16,76	536	19,72	640	19,58	819
	24	2	20,00	384	18,31	433	16,78	569	18,31	695
500	0	0	14,08	53	13,99	72	15,71	83	13,89	96
	6	1	19,72	55	20,00	74	18,57	86	16,90	105
	6	1,5	18,57	78	18,57	97	16,90	117	17,14	140
	6	2	17,14	65	14,29	81	15,49	100	13,97	120
	12	1	19,72	74	19,67	90	19,58	117	19,72	145
	12	1,5	19,72	97	18,28	145	19,75	167	19,66	184
	12	2	19,66	86	19,58	109	18,18	126	18,57	147
	24	1	18,31	70	15,47	91	15,49	108	14,08	122
	24	1,5	16,90	89	16,67	115	19,58	129	18,05	162
	24	2	17,14	113	16,90	135	16,78	150	19,44	179

oranında ilavesi durumunda %9,80 ve 24 mm boylu fiberin %1,5 oranında ilavesi durumunda %12,69 olmuştur. Diğer bir örnekte kuru numuneye 500 ml su ilave edilerek hazırlanan numunelerde çevre basıncının 400 kPa olduğu durumda kırılmada birim boy değişimleri doğal numune için %13,89, 6 mm boylu fiberin %1,5 oranında ilavesi durumunda %16,90, 12 mm boylu fiberlerin %1,5 oranında durumunda %19,66 ve 24 mm boylu fiberin %1,5 oranında ilavesi durumunda %18,05 olmuştur. Buradan artan çevre basıncı ile doğal numunede daha baskın olmak üzere kırılmada birim boy değişimi oranlarının arttığı söylenebilir. Numunelerde doygunluğun artması ile kırılmada şekil değiştirme oranları da %20 değerine yönelmektedir. Şekil 5.8.'de 400 ml su ilavesiyle sıkıştırılarak hazırlanmış

doygun olmayan numunelerin 400 kPa çevre basıncında kesildiği durumlara ait gerilme-eksenel şekil değiştirme grafikleri örnek olarak sunulmaktadır.

Tablo 5.6. Doygun numunelerde maksimum deviator gerilme ve kırılmada boy değişimi değerleri

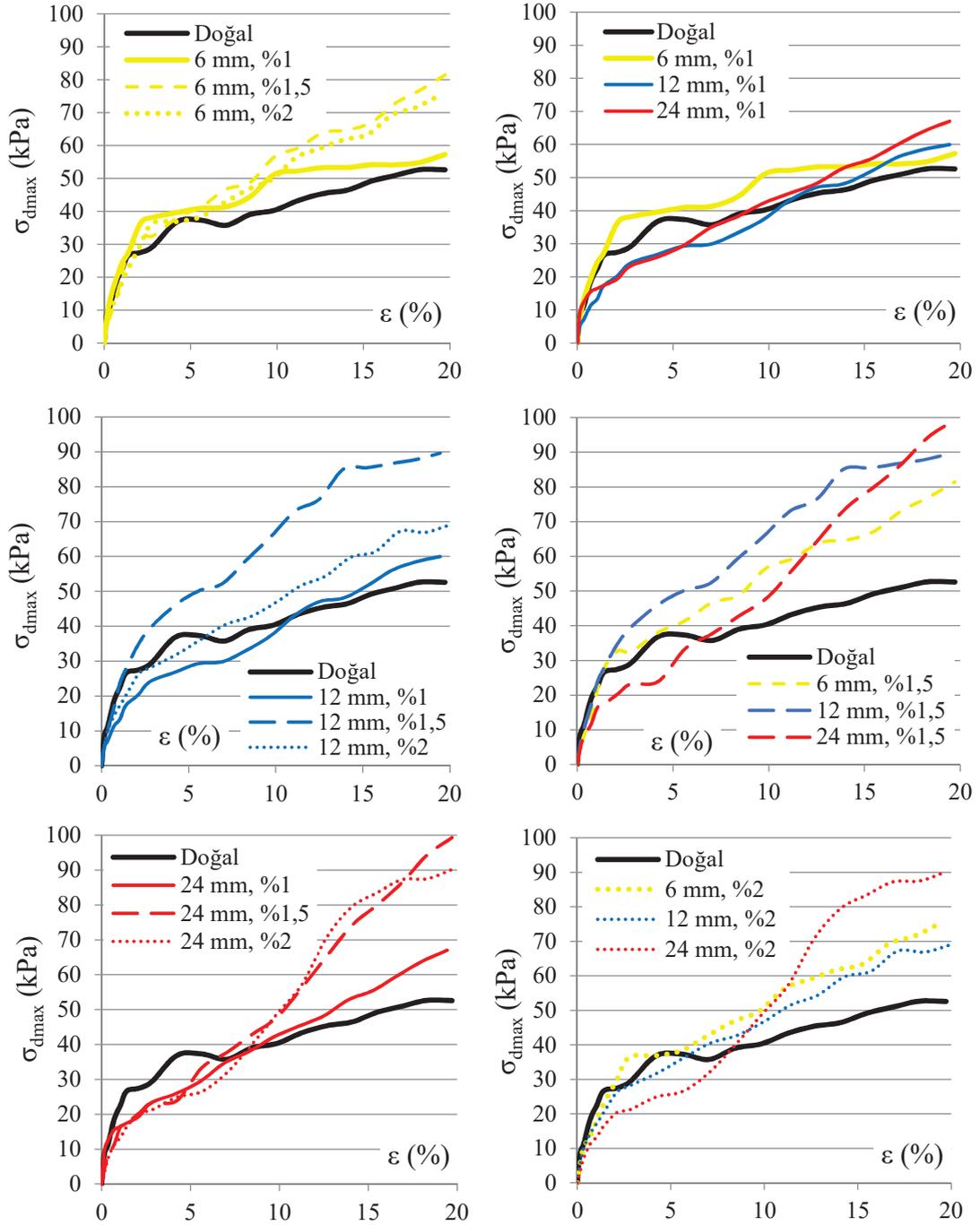
Düşey gerilme (kPa)	Fiber boyu (mm)	Fiber oranı (%)	σ_3 : 100 kPa		σ_3 : 200 kPa		σ_3 : 300 kPa		σ_3 : 400 kPa	
			$\epsilon_{kırılma}$ (%)	$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)	$\epsilon_{kırılma}$ (%)	$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)	$\epsilon_{kırılma}$ (%)	$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)	$\epsilon_{kırılma}$ (%)	$\sigma_{d,maks.}$ (kPa)
100	0	0	19,72	43,41	18,54	47,17	20,00	49,08	18,31	52,67
	6	1	13,99	47,14	19,72	48,42	20,00	51,58	19,72	57,28
	6	1,5	20,06	64,47	20,00	72,38	19,72	78,48	19,72	81,45
	6	2	19,72	50,93	20,00	61,92	18,06	71,58	19,44	75,39
	12	1	18,31	50,97	19,58	54,05	19,72	57,60	19,44	59,97
	12	1,5	19,58	68,58	19,72	78,03	16,67	85,79	19,44	89,63
	12	2	18,57	54,19	19,72	60,60	16,90	64,81	20,00	69,05
	24	1	19,44	53,61	18,06	59,31	19,72	63,45	19,44	67,02
	24	1,5	19,18	75,64	19,44	82,46	19,58	91,16	19,72	99,35
	24	2	19,72	65,95	19,72	71,80	19,44	81,26	19,72	90,16
200	0	0	18,18	97,85	19,44	103,04	19,72	108,53	19,58	117,25
	6	1	18,18	102,10	19,44	109,74	19,58	115,58	19,44	123,98
	6	1,5	20,00	119,80	19,72	128,57	19,72	140,26	19,58	147,18
	6	2	19,44	114,77	18,18	123,37	20,00	128,85	19,58	140,50
	12	1	20,59	119,74	16,90	128,76	18,06	136,34	18,31	142,75
	12	1,5	20,03	131,48	20,00	138,93	19,72	150,27	19,44	159,16
	12	2	19,58	117,92	19,69	125,27	19,58	129,72	19,69	132,79
	24	1	19,58	126,28	19,44	139,90	19,58	145,51	19,58	156,44
	24	1,5	19,58	139,66	19,44	147,44	19,44	151,59	19,44	161,68
	24	2	19,58	130,46	19,44	140,77	19,58	147,19	19,44	160,00
300	0	0	20,00	99,62	18,60	111,74	20,00	122,70	20,03	132,19
	6	1	19,72	136,92	19,75	149,39	19,75	161,16	19,58	168,09
	6	1,5	19,72	141,09	19,58	166,54	20,00	174,70	19,72	188,68
	6	2	19,72	139,50	19,58	164,00	20,00	173,87	19,58	177,29
	12	1	19,75	146,05	19,72	153,61	19,72	165,30	19,58	175,23
	12	1,5	19,58	171,44	18,31	175,85	19,58	179,80	19,72	193,96
	12	2	18,18	152,28	19,86	162,51	19,72	176,99	19,69	132,79
	24	1	19,58	153,88	18,57	160,89	19,44	171,58	19,58	182,31
	24	1,5	19,58	163,08	20,00	177,20	19,72	181,16	20,00	193,01
	24	2	20,00	156,40	19,72	167,81	19,58	173,95	19,72	183,88



Şekil 5.8. Doygun olmayan numunelerde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (su: 400 ml, $\sigma_3=400$ kPa)

Doygun zeminlerde ise numunenin fiber takviyeli olup olmamasına bakılmaksızın hemen hepsinde maksimum gerilme değerleri için %20'ler civarında boy değişimlerinin gerçekleşmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Şekil 5.9.'da 100 kPa gerilme etkisinde konsolide edilerek hazırlanmış doymun numunelerin 400 kPa çevre

basıncında kesildiği durumlara ait gerilme-eksenel şekil değiştirme grafikleri örnek olarak sunulmaktadır.



Şekil 5.9. Doygun numunelerde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ($\sigma_{kons}=100$ kPa, $\sigma_3=400$ kPa)

Şekilden numunelerin tamamının doygun olması nedeniyle hiçbir numunede gevrek kırılma görülmediği, maksimum bir gerilme değerinden geçilmediği için de tüm

deneylerin %20 deformasyona kadar devam ettirildiği anlaşılabilmektedir. Burada dikkat çeken konu numunelerin birçoğunda %7 civarında bir deformasyona kadar fiber etkisinin açık bir şekilde görünmemesi, bunun ötesinde ise bazalt fiberlerin dayanıma katkısının belirgin bir şekilde ortaya çıkmasıdır. Tüm fiber boyları için %1.5 katkı oranının maksimum artışı sağladığı, ayrıca dayanımdaki maksimum artışın 24 mm boyundaki fiberlerde gerçekleştiği de Şekil 5.9.'dan görülmektedir. Ayrıca eğrilerin şeklinden dayanımdaki artışların sabit oranlarda olmadığı görülmekte olup, bunun nedeni de bazalt fiberin siltli zemine rastgele karıştırılması olduğudur.

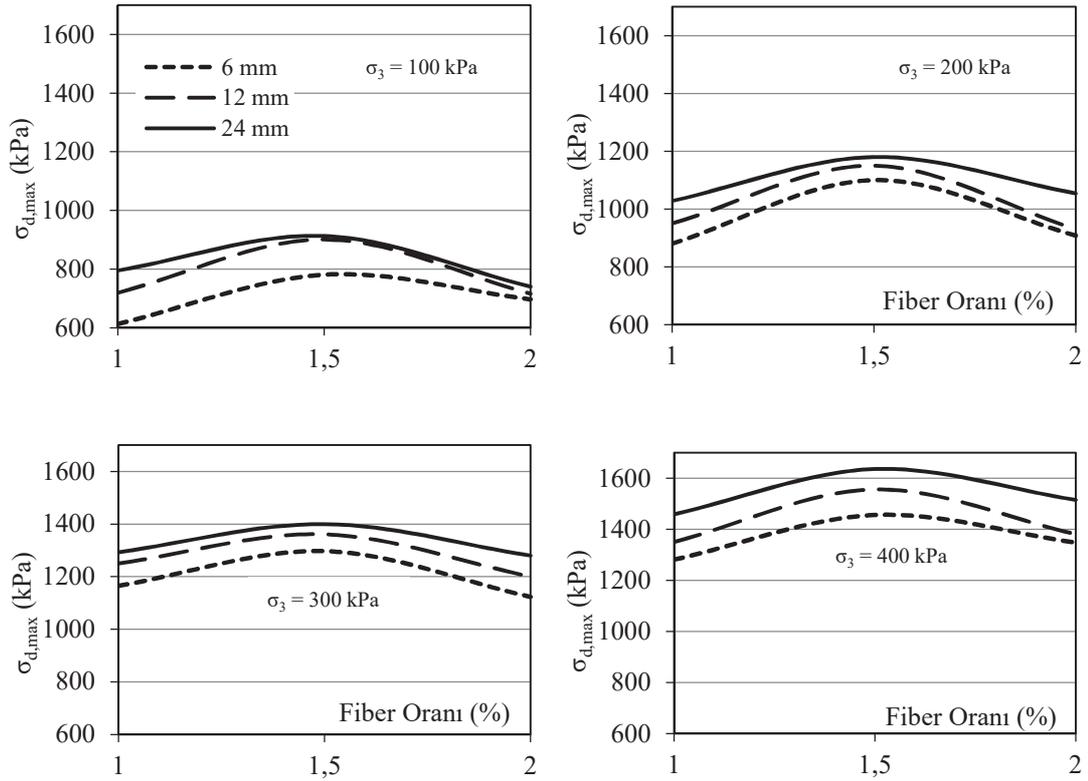
5.5. Doygun Olmayan ve Doygun Numunelerde Fiber Oranı Etkisi

5.5.1. Doygun olmayan numunelerde fiber oranı etkisi

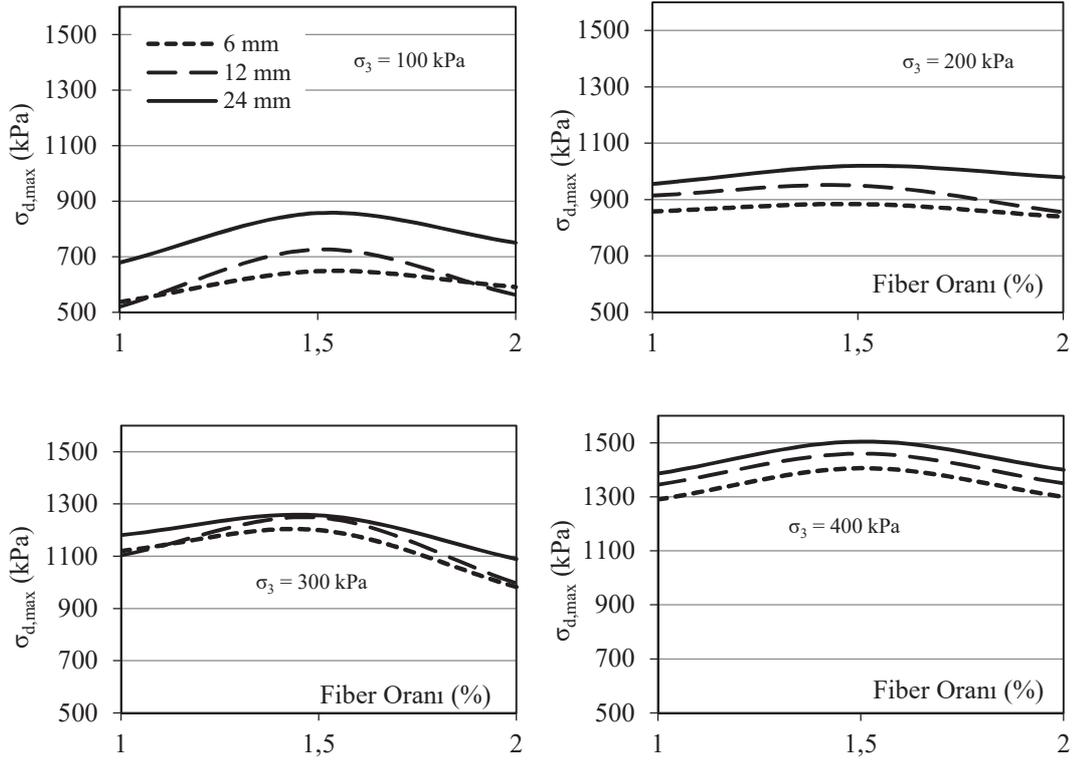
Doygun olmayan siltli numunelerde bazalt fiber içeriğinin drenajsız kayma direnci üzerindeki etkisi farklı su muhtevaları için Şekil 5.10., 5.11., 5.12., 5.13. ve Şekil 5.14.'de gösterilmektedir. Şekillerden görülebileceği gibi, fiber uzunluğu aynı olduğunda, fiber katkılı siltli zemin numunelerinin dayanımları fiber içeriğinin artmasıyla birlikte önce artmakta, daha sonra ise azalan bir eğilim göstermektedir. Fiber oranı %1,5 iken, denenen tüm numunelerde maksimum deviatör gerilme değerleri en yüksek değerlerini almaktadır. Bazalt fiber oranı %2 olduğunda ise dirençlerin azaldığı görülmektedir. Numunelerin tamamında görülen bu davranış fiber oranının bir optimum değeri olduğunu göstermekte olup, bu çalışmada %1,5 olarak elde edilmiştir. Dayanımların çevre basıncının artması ile arttığı, su muhtevasının artmasıyla da düştüğü de şekillerden görülmektedir. 100 ml su ile hazırlanan numunelerde dayanım 900 kPa değerlerinden 1700 kPa değerlerine çıkarken, 500 ml su ilavesiyle hazırlanan numunelerde değerler 110 kPa'dan 200 kPa civarına yükselmiştir.

5.5.2. Doygun numunelerde fiber oranı etkisi

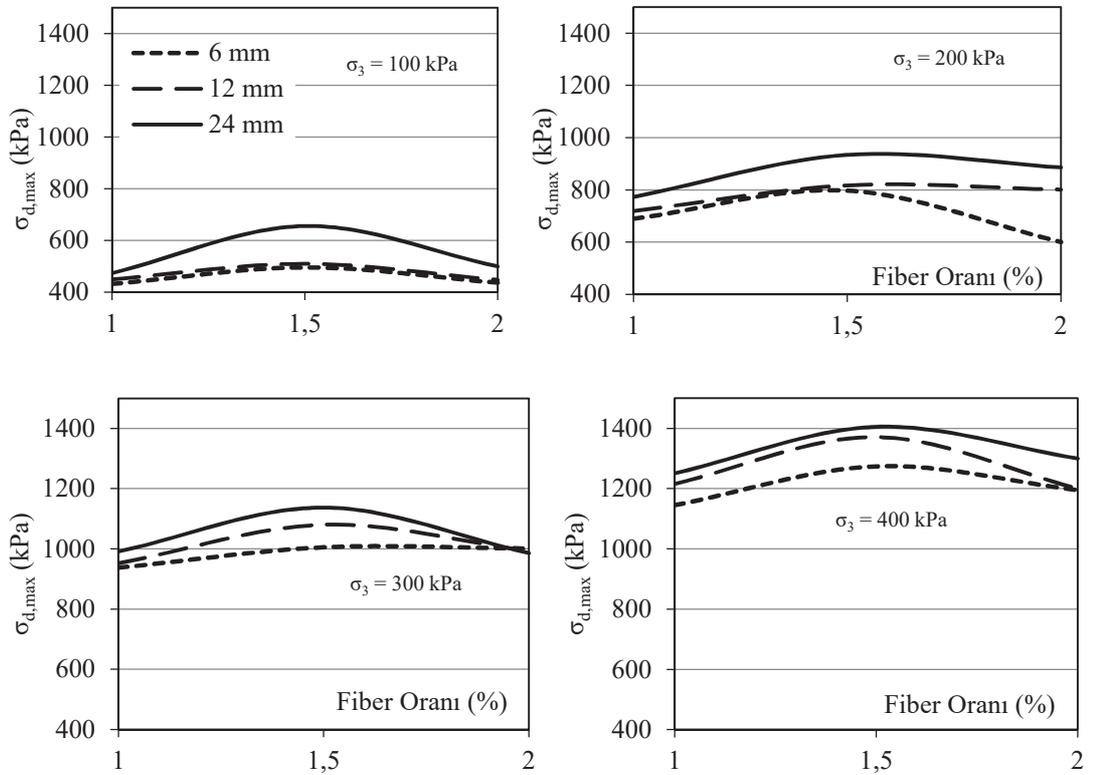
Doygun siltli numunelerde bazalt fiber içeriğinin drenajsız kayma direnci üzerindeki etkisi farklı konsolidasyon gerilmeleri için Şekil 5.15., 5.16. ve Şekil 5.17.'de gösterilmektedir. Bu şekillerden de anlaşılacağı üzere davranış değişmemekte, doymun olmayan numunelere benzer olarak fiber uzunluğu aynı olduğunda, fiber katkılı siltli zemin numunelerinin dayanımları fiber içeriğinin artmasıyla birlikte önce artmakta, daha sonra ise azalan bir eğilim göstermektedir. Bu örneklerde de fiber oranı %1,5 iken, denenen tüm numunelerde maksimum deviator gerilme değerleri en yüksek değerlerini almakta, bazalt fiber oranı %2 olduğunda ise dirençlerin azaldığı görülmektedir. Numunelerin tamamında görülen bu davranış doymun numunelerde de fiber oranının bir optimum değeri olduğunu göstermekte olup, bu değer %1,5 olarak elde edilmektedir.



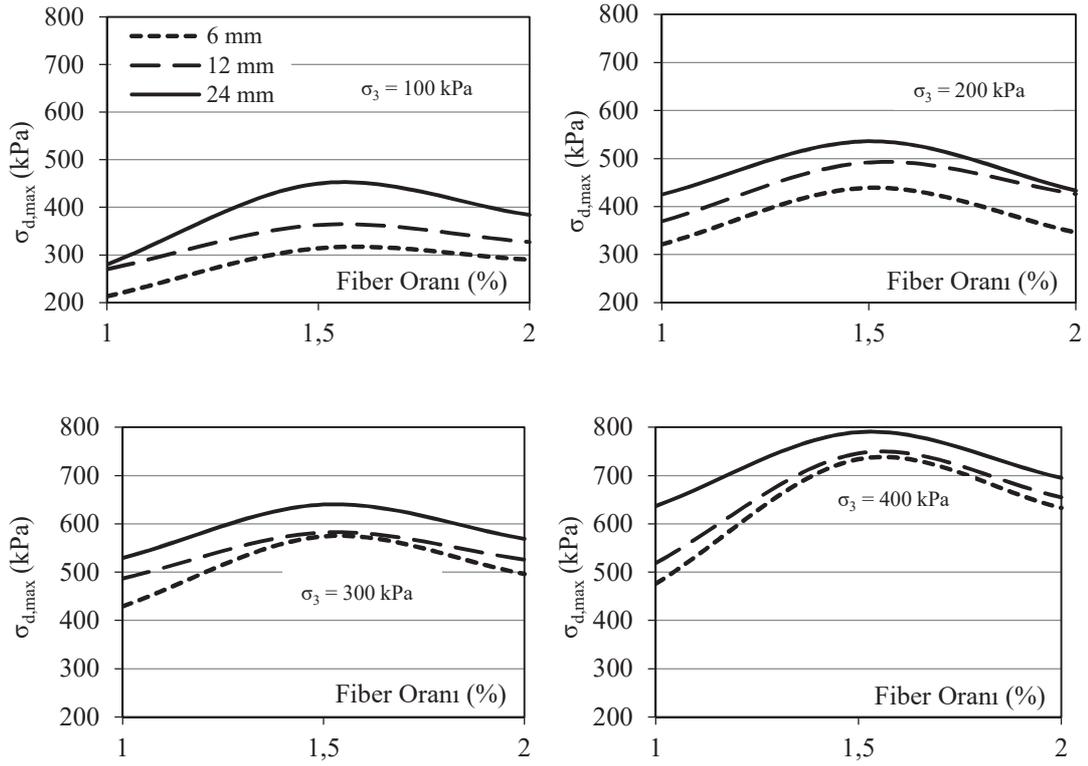
Şekil 5.10. Doygun olmayan zeminlerde (su: 100 ml) dayanım - fiber oranı ilişkisi



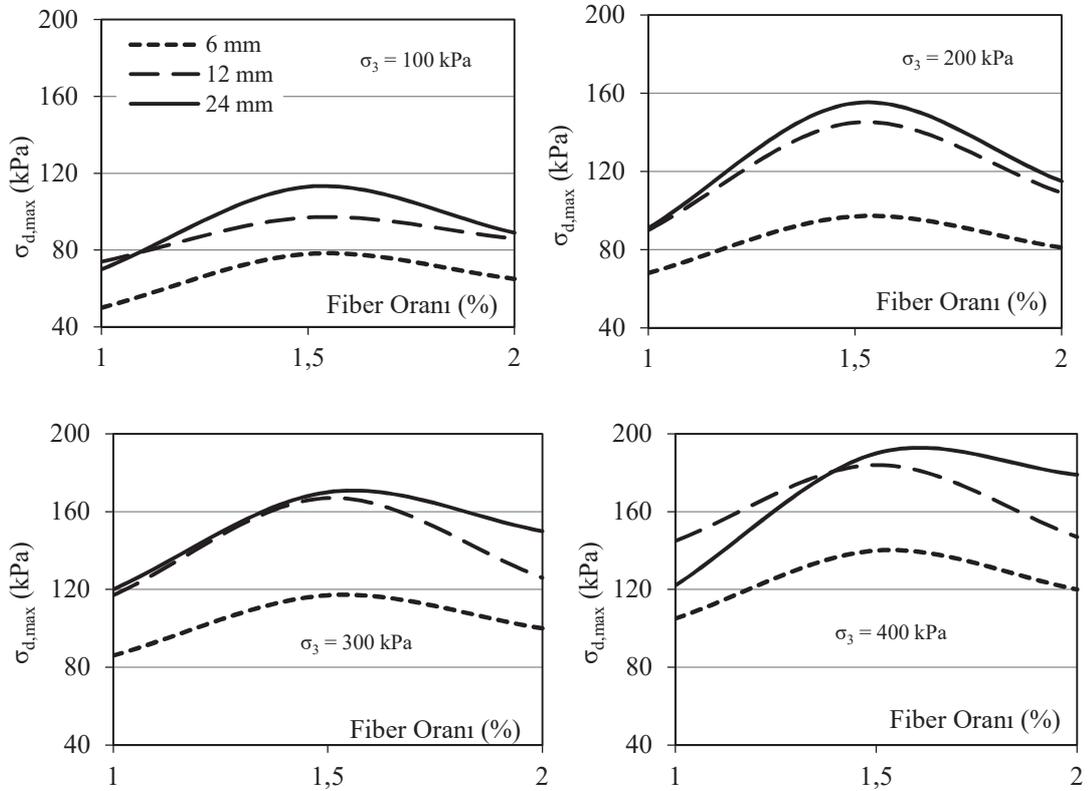
Şekil 5.11. Doymun olmayan zeminlerde (su: 200 ml) dayanım - fiber oranı ilişkisi



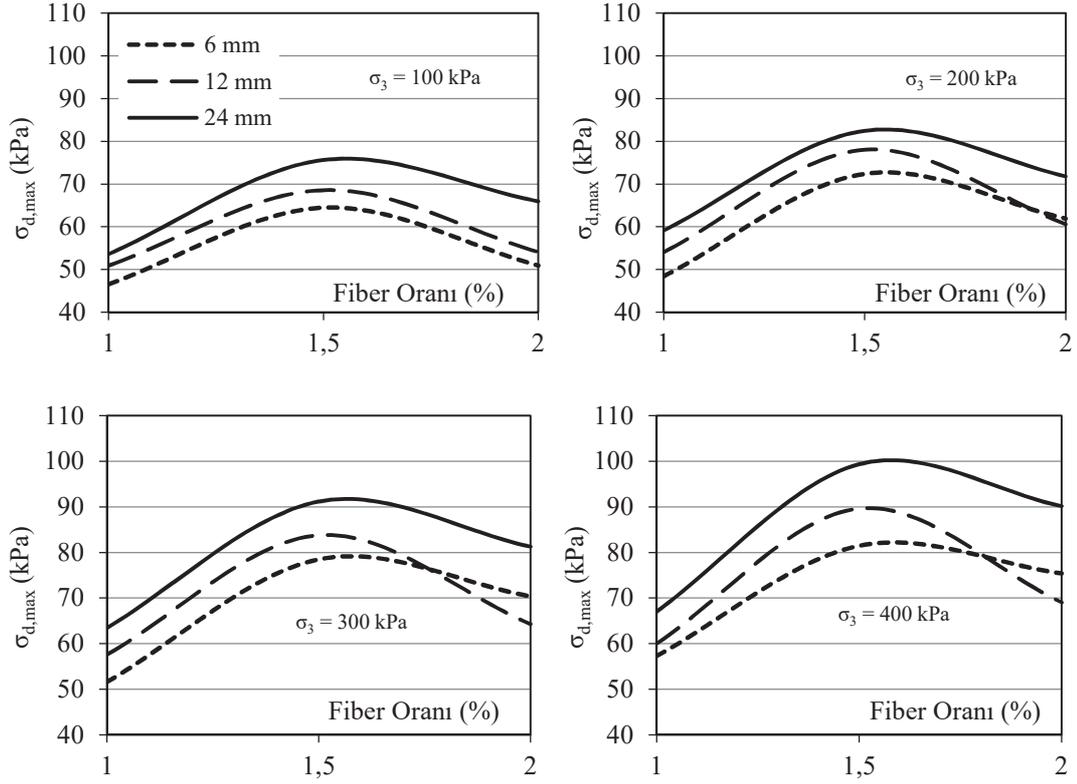
Şekil 5.12. Doymun olmayan zeminlerde (su: 300 ml) dayanım - fiber oranı ilişkisi



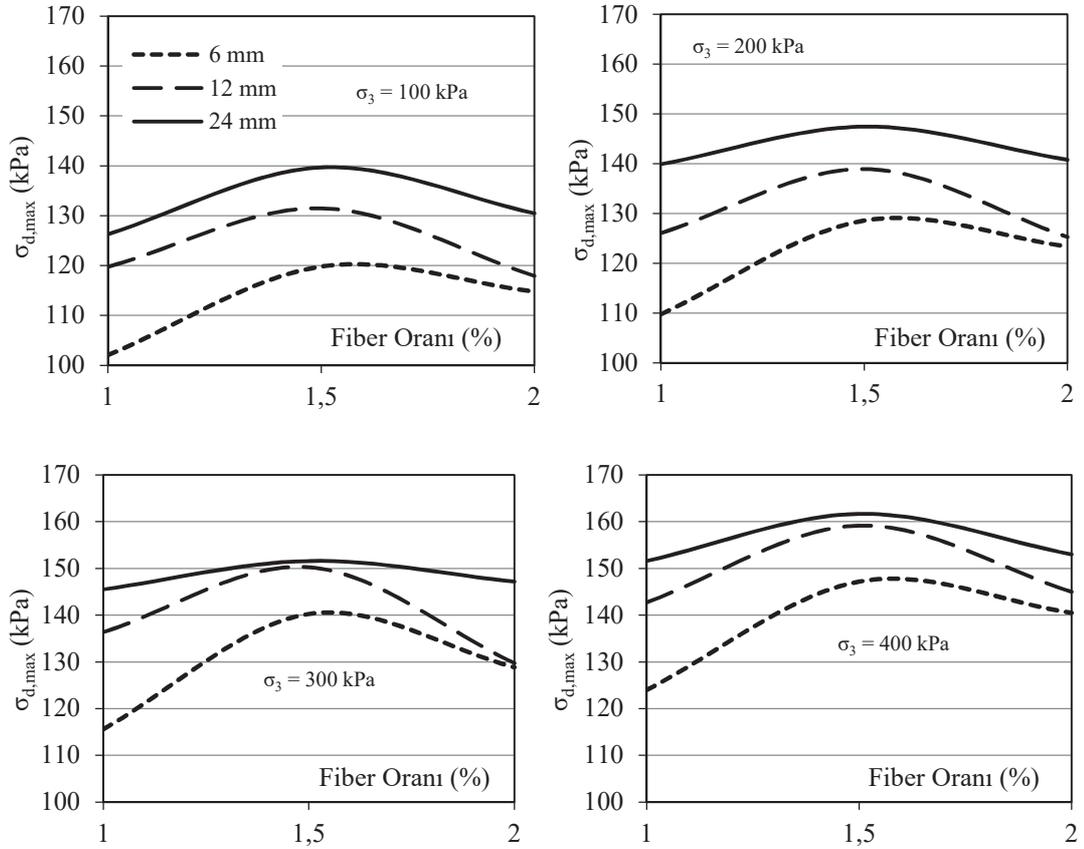
Şekil 5.13. Doygun olmayan zeminlerde (su: 400 ml) dayanım - fiber oranı ilişkisi



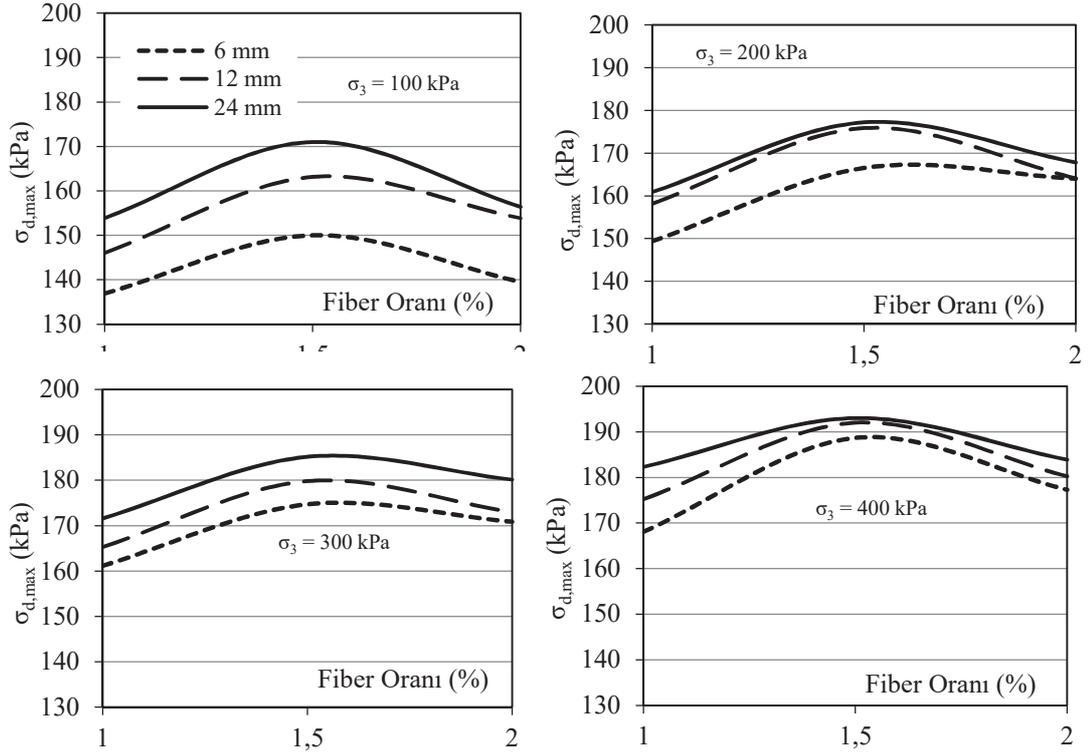
Şekil 5.14. Doygun olmayan zeminlerde (su: 500 ml) dayanım - fiber oranı ilişkisi



Şekil 5.15. Doymun zeminlerde ($\sigma_{kons}=100$ kPa) dayanım - fiber oranı ilişkisi



Şekil 5.16. Doymun zeminlerde ($\sigma_{kons}=200$ kPa) dayanım - fiber oranı ilişkisi



Şekil 5.17. Doymun zeminlerde ($\sigma_{kons}=300$ kPa) dayanım - fiber oranı ilişkisi

Dayanımların çevre basıncının artması ile arttığı, su muhtevasının artmasıyla da düştüğü de şekillerden görülmektedir. 100 kPa konsolidasyon basıncında hazırlanan numunelerde dayanım 75 kPa değerlerinden 100 kPa değerlerine çıkarken, 300 kPa konsolidasyon basıncında hazırlanan numunelerde değerler 170 kPa'dan 200 kPa civarına yükselmiştir.

Yukarıda verilen tablo ve şekiller birlikte değerlendirildiğinde bazalt fiber yüzdesinin hem doymun olmayan hem de doymun silt zeminin drenajsız kayma direnci üzerinde doğrudan etkiye sahip olduğu görülmektedir. Bazalt fiber oranı oldukça az olduğunda, fiberler arasındaki mesafe büyüktür, fiber-zemin kolonları ve zemin daneleri verimli bir fiber-zemin ağı oluşturamaz. Zemin dış kuvvete maruz kaldığında, kuvvet dağınık fiber-zemin kolonları ve zemin partikülleri arasında aktarılır. Bazalt fiber içeriği giderek arttığında, fiber aralığı azalmakta, böylece bitişik fiber-zemin kolonları etkili bir fiber-zemin ağı oluşturmak üzere kolayca keşismektedir. Bu durumda zemin bir dış kuvvete tabi tutulduğunda, bir bütün olarak hareket eden zemin ve fiber iskeleti nedeniyle, kuvvet fiber-zemin ağı ve zemin

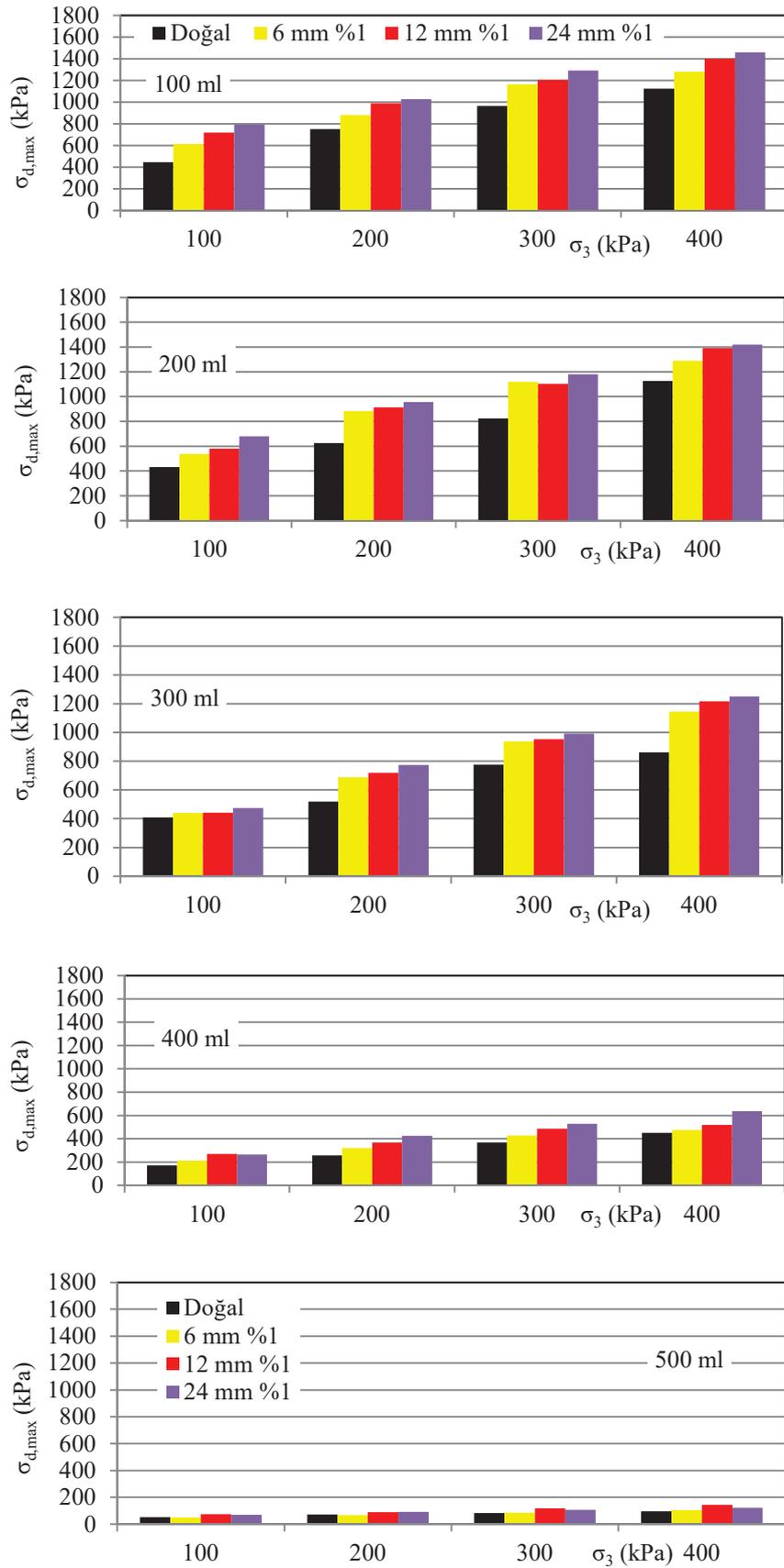
partikülleri arasında kolayca transfer edilmektedir. Bununla birlikte, bazalt fiber oranı optimum değeri aştığında, deney sonuçları iyileştirme etkisinin daha iyi olmadığını göstermektedir. Bazalt fiber içeriği oldukça fazla olduğunda, fiberler zemin içinde kümeler halinde toplanmakta ve bu da fiberlerin eşit dağılımını zorlaştırmaktadır. Bu da, fiber takviyesinin zemin üzerindeki etkisini azaltmaktadır. Bu çalışmada denenen tüm fiber boyları için %1.5 katkı oranının maksimum artışı sağladığı, ayrıca dayanımdaki maksimum artışın 24 mm boyundaki fiberlerde gerçekleştiği de Şekil 5.10. ve Şekil 5.17. arasındaki şekillerden görülmektedir.

5.6. Doygun Olmayan ve Doygun Numunelerde Fiber Boyu Etkisi

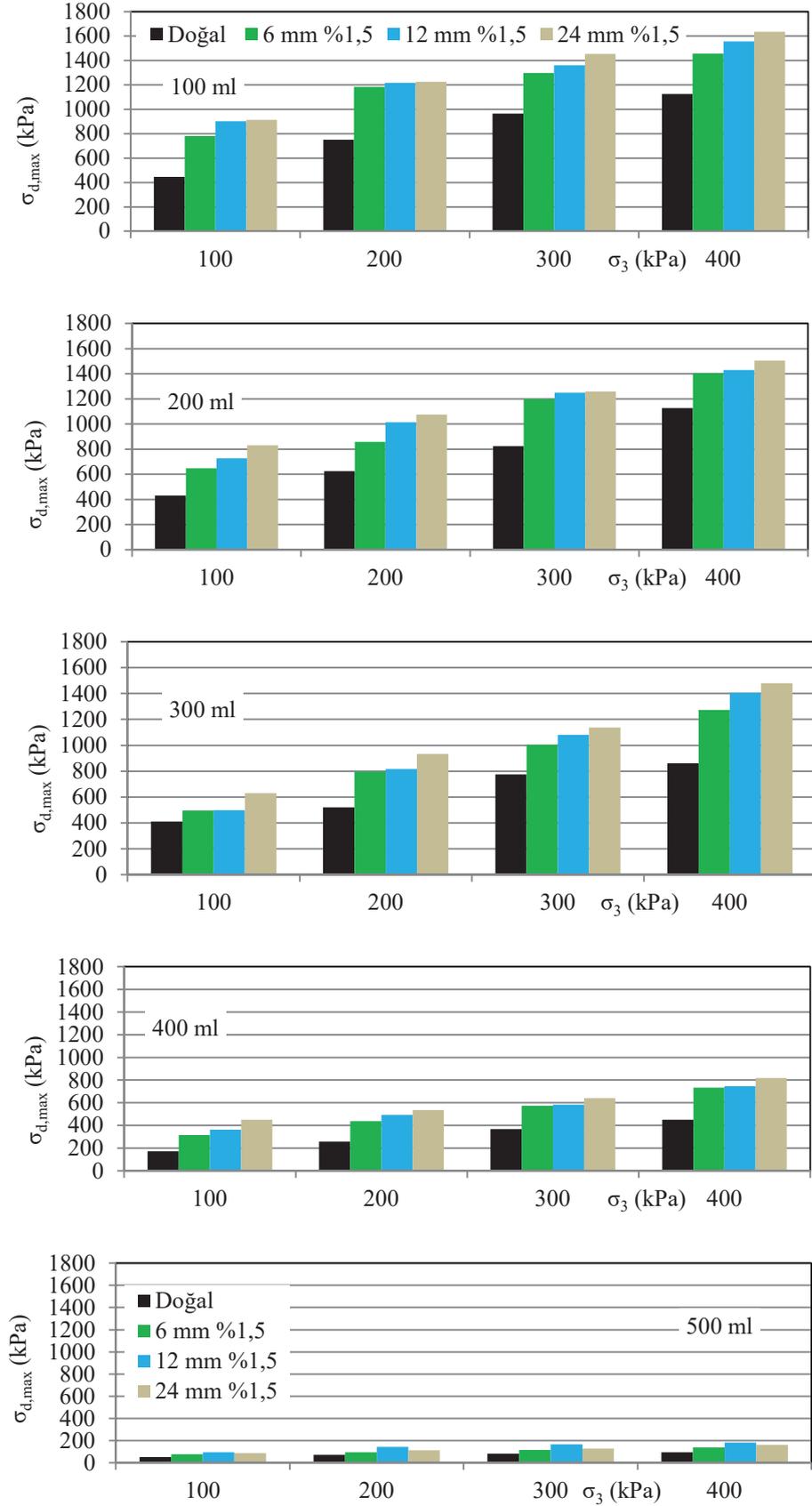
5.6.1. Doygun olmayan numunelerde fiber boyu etkisi

Doygun olmayan siltli numunelerde bazalt fiber boyunun drenajsız kayma direnci üzerindeki etkisi farklı su muhtevaları için Şekil 5.18., 5.19. ve Şekil 5.20.'de gösterilmektedir. Şekillerden görülebileceği gibi, fiber oranı aynı olduğunda, fiber katkılı siltli zemin numunelerinin dayanımları fiber boyunun artmasıyla sürekli olarak artmaktadır. Fiber boyu 24 mm iken, çok yumuşak birkaç örnek haricinde denenen tüm numunelerde maksimum deviatör gerilme değerleri en yüksek değerlerini almaktadır.

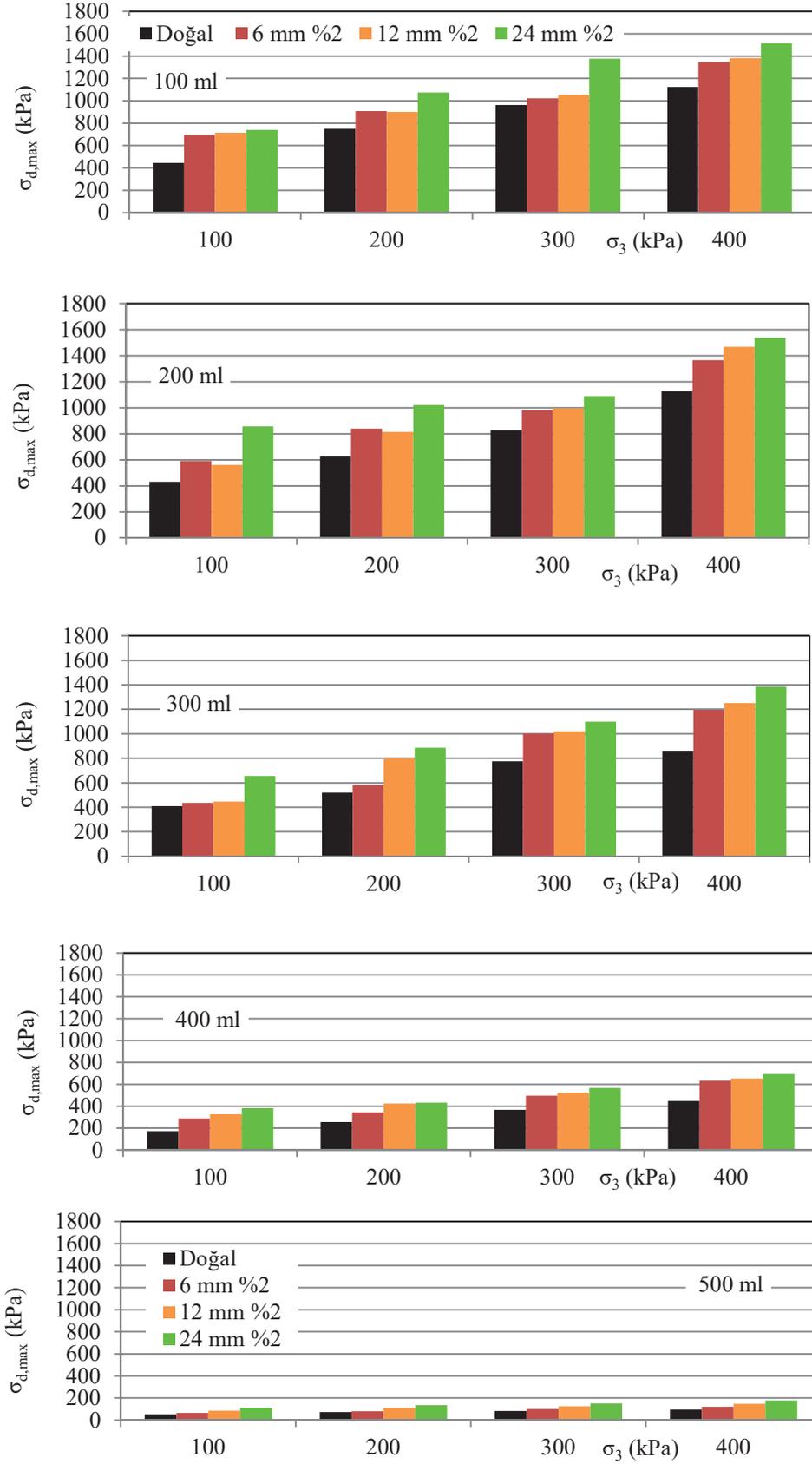
Dayanımların çevre basıncının artması ile arttığı, su muhtevasının artmasıyla da düştüğü de şekillerden görülmektedir. 100 ml su ile hazırlanan numunelerde 100 kPa çevre basıncında %1 bazalt fiber katkısı için dayanım 6 mm uzunlukta fiber kullanılan numunelerde 446 kPa'dan 613 kPa'a, 12 mm uzunlukta fiber kullanılan numunelerde 719 kPa'a ve 24 mm uzunlukta fiber kullanılan numunelerde 795 kPa'a yükselmiştir. Diğer bir örnekle 500 ml su ile hazırlanan numunelerde 400 kPa çevre basıncında %2 bazalt fiber katkısı için dayanım 6 mm uzunlukta fiber kullanılan numunelerde 96 kPa'dan 120 kPa'a, 12 mm uzunlukta fiber kullanılan numunelerde 147 kPa'a ve 24 mm uzunlukta fiber kullanılan numunelerde 179 kPa'a yükselmiştir.



Şekil 5.18. %1 fiber katkılı doymayan zeminde dayanım - fiber boyu ilişkisi



Şekil 5.19. %1,5 fiber katkılı doygun olmayan zeminde dayanım - fiber boyu ilişkisi



Şekil 5.20. %2 fiber katkılı doymayan zeminde dayanım - fiber boyu ilişkisi

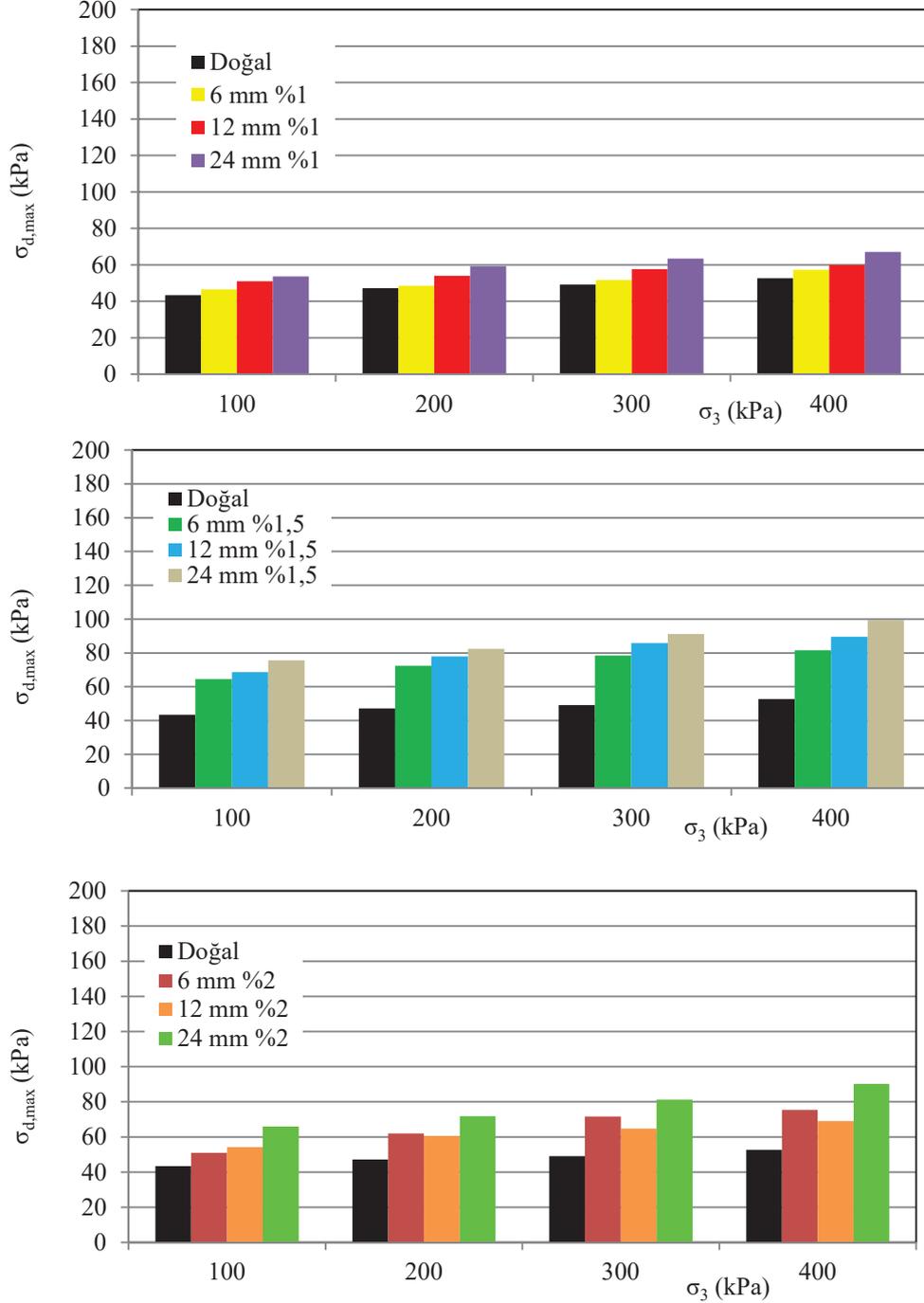
5.6.2. Doygun numunelerde fiber boyu etkisi

Doygun siltli numunelerde bazalt fiber boyunun drenajsız kayma direnci üzerindeki etkisi farklı su muhtevaları için Şekil 5.21., 5.22. ve Şekil 5.23.'de gösterilmektedir. Şekillerden görülebileceği gibi, fiber oranı aynı olduğunda, fiber katkılı siltli zemin numunelerinin dayanımları fiber boyunun artmasıyla sürekli olarak artmaktadır. Fiber boyu 24 mm iken, iki örnek haricinde denenen tüm numunelerde maksimum deviatör gerilme değerleri en yüksek değerlerini almaktadır.

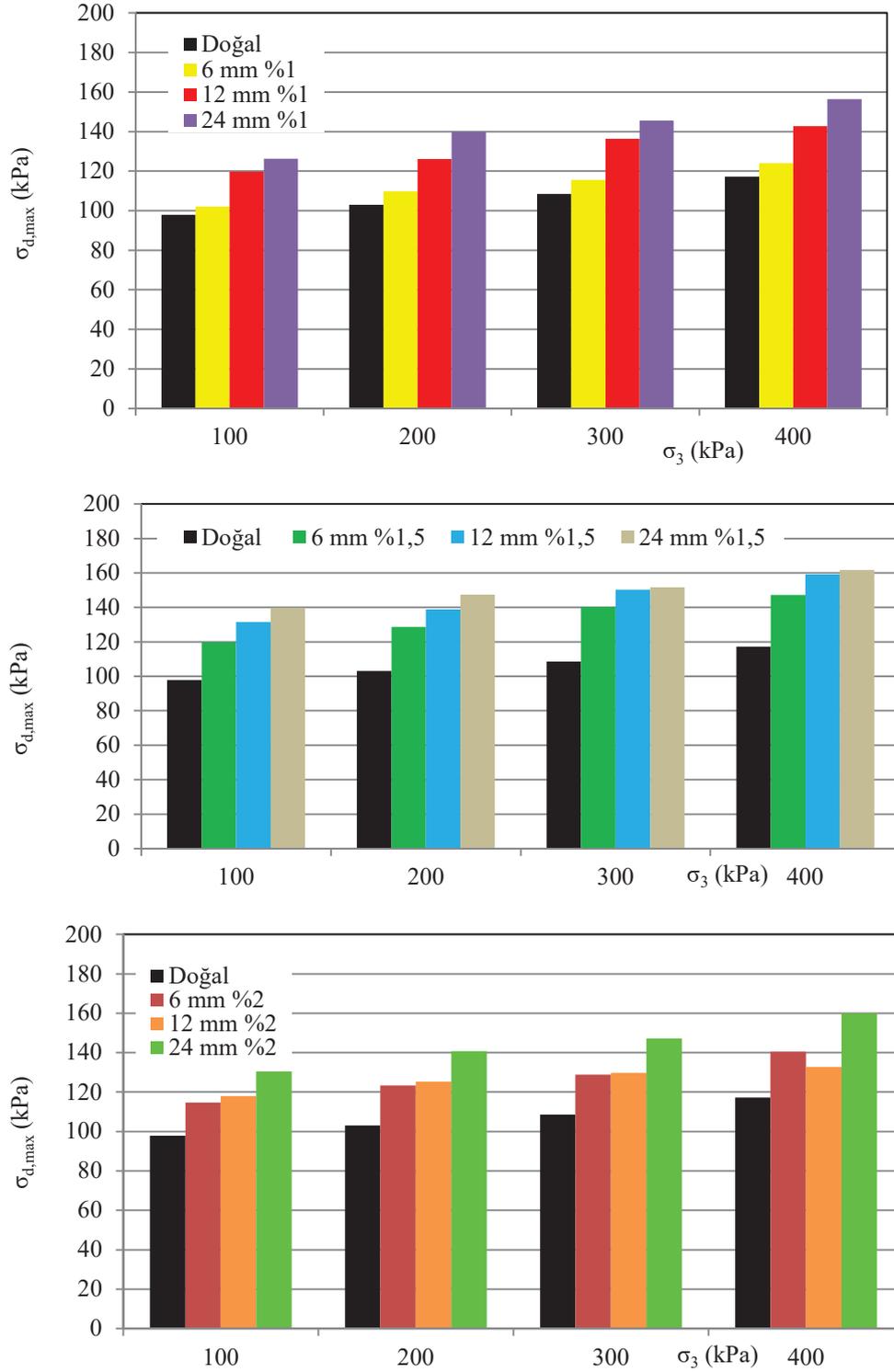
Dayanımların çevre basıncının artması ile arttığı, su muhtevasının artmasıyla da düştüğü de şekillerden görülmektedir. 100 kPa konsolidasyon basıncında hazırlanan numunelerde 100 kPa çevre basıncında %1 bazalt fiber katkısı için dayanım 6 mm uzunlukta fiber kullanılan numunelerde 43 kPa'dan 47 kPa'a, 12 mm uzunlukta fiber kullanılan numunelerde 51 kPa'a ve 24 mm uzunlukta fiber kullanılan numunelerde 54 kPa'a yükselmiştir. Diğer bir örnekle 300 kPa konsolidasyon basıncında hazırlanan numunelerde 400 kPa çevre basıncında %2 bazalt fiber katkısı için dayanım 6 mm uzunlukta fiber kullanılan numunelerde 132 kPa'dan 177 kPa'a, 12 mm uzunlukta fiber kullanılan numunelerde 173 kPa'a ve 24 mm uzunlukta fiber kullanılan numunelerde 184 kPa'a yükselmiştir.

Yukarıda verilen tablo ve şekiller birlikte birlikte incelendiğinde, bazalt fiber uzunluğunun iyileştirme miktarında çok önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Bazalt fiberler çok kısa olduğunda, numune içinde oluşan fiber-zemin kolonları da çok kısa kalmaktadır. Çevredeki zemin partiküllerinin neden olduğu yanal gerilmeler oldukça küçüktür ve bu da fiberlerin tamamının sınırlandırılmasını zorlaştırmaktadır. Zemin-fiber kolonları arasındaki temas düşük olup gerilme iletimi zorlaşmakta ve fiber-zemin ağı etkili bir şekilde oluşturulamadığından bazalt fiberler ile zemin partikülleri arasında kolayca kayma gerçekleşebilmektedir. Bu nedenle, iyileştirme etkisini etkili bir şekilde görmek zor olmaktadır. Bu, 6 mm'lik fiber takviyeli zemin numuneleri üzerinde yürütülen deney sonuçlarına göre doğrulanmaktadır. Buna göre fibersiz zemine kıyasla, güçlendirilmiş zeminin mukavemeti pek fazla artmamaktadır. Bununla birlikte, optimum bazalt fiber oranı belirlendiğinde, bazalt fiberlerinin uzunluğu arttıkça fiberler ve zemin partikülleri arasındaki temas alanı

artmakta, fiber-zemin ağı daha etkili bir şekilde oluşturulabildiğinden gerilmelerin iletilmesi kolaylaşmaktadır.



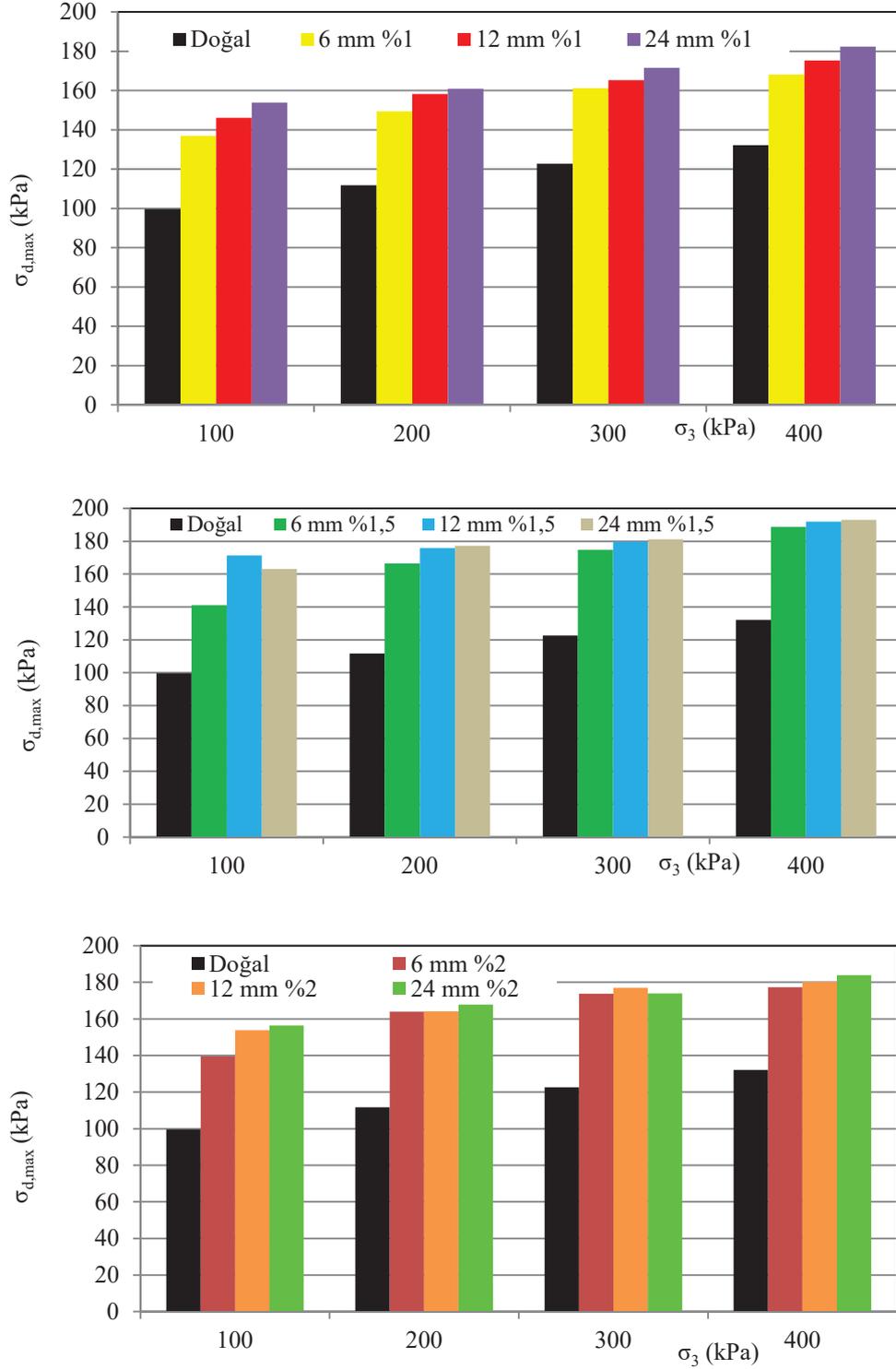
Şekil 5.21. Doygun zeminlerde ($\sigma_{kons}=100$ kPa) dayanım - fiber boyu ilişkisi



Şekil 5.22. Doymun zeminlerde ($\sigma_{kons}=200$ kPa) dayanım - fiber boyu ilişkisi

Gao vd. (2015) çalışmalarında, bazalt fiber boyunun aşırı uzun olması durumunda fiberlerin sürekli eğilme etkisinde olduğunu, bu nedenle de dayanımın düşebileceğini belirtmektedirler. Bu bulgudan hareketle 24 mm'den daha uzun fiberlerin

kullanılmasıyla yürütülecek deneyler, optimum bazalt fiber boyunun varlığının tespitini sağlayacaktır.



Şekil 5.23. Doymun zeminlerde ($\sigma_{kons}=300$ kPa) dayanım - fiber boyu ilişkisi

BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu doktora tezinde bazalt fiberin zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabileceği ortaya konmuştur. Tez çalışması kapsamında 200'ü doygun olmayan ve 120'si de doygun olan toplam 320 adet numunede konsolidasyonsuz drenajsız hücre kesme deneyleri (UU) gerçekleştirilmiştir. Deneylerde numune olarak, Adapazarı Yenigün Mahallesiinde yüzeyin 3-4 m altından alınmış olan ve ince içeriği %88,3, kil içeriği %8-11 olan silt kullanılmıştır.

Doğal ve bazalt fiber katkıli olarak hazırlanan doygun ve doygun olmayan numunelerin kullanıldığı bu çalışmada konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyleri (UU) gerçekleştirilerek malzeme davranışı tespit edilmiştir. Bazalt fiber takviyeli karışımlarda farklı boy ve oranlarda fiber kullanılarak, fiber boyu ve oranının doygun olan ve doygun olmayan zeminlerin kayma direncini arttırıcı etkisi gözlemlenmiştir.

Mekanik deneyler için, doğal zemin örnekleri 100 ml - 200 ml - 300 ml - 400 ml ve 500 ml su ilave edilerek karıştırılmış ve standart proktor aleti ile sıkıştırılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında ise doygun zemin örnekleri, 100 kPa - 200 kPa ve 300 kPa düşey gerilme altında konsolidasyona tabi tutularak elde edilmiştir. Birinci aşamada kompaksiyondan, ikinci aşamada ise konsolidasyon sürecinden sonra elde edilen her bir numuneden 4'er adet silindirik numune alınarak farklı çevre basınçlarında (100 kPa - 200 kPa - 300 kPa ve 400 kPa) konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyleri (UU) yapılmıştır. Çalışmanın her iki safhasında da doğal numuneler üzerinde deneyler bitirildikten sonra aynı işlemler 6 mm - 12 mm ve 24 mm boylarında bazalt fiberlerin, doğal zemine ağırlıkça %1 - %1,5 ve %2 oranında karıştırılarak elde edilmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Bunun yanında makroskopik görüntüler ve mikroyapı arasında bir korelasyon oluşturmak için, SEM analizleri doğal zemin örnekleri ve bazalt fiberleri ile güçlendirilmiş örnekler üzerinde gerçekleştirmiştir. Bu doktora tezi çalışmasının sonuçları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

6 mm uzunluktaki bazalt fiber katkısıyla elde edilen doygun olmayan numuneler üzerinde yürütülen konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyleri (UU) sonucunda tüm karışımlar arasında en yüksek dayanım artışı %1,5 bazalt fiberli karışımda (100 ml su ilavesi ve 100 kPa hücre basıncında) elde edilmiş, bazalt fiberli karışımda şahit numuneye oranla %75,11'lik bir iyileşme olduğu saptanmıştır.

12 mm uzunluktaki bazalt fiber katkısıyla elde edilen doygun olmayan numuneler üzerinde yürütülen UU deneyleri sonucunda tüm karışımlar arasında en yüksek dayanım artışı %1,5 bazalt fiberli karışımda (400 ml su ilavesi ve 100 kPa hücre basıncında) elde edilmiş, bazalt fiberli karışımda şahit numuneye oranla %75,11'lik bir iyileşme olduğu saptanmıştır.

24 mm uzunluktaki bazalt fiber katkısıyla elde edilen doygun olmayan numuneler üzerinde yürütülen UU deneyleri sonucunda tüm karışımlar arasında en yüksek dayanım artışı %1,5 bazalt fiberli karışımda (400 ml su ilavesi ve 100 kPa hücre basıncında) elde edilmiş, bazalt fiberli karışımda şahit numuneye oranla %160,12'lik bir iyileşme olduğu saptanmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında doygun numuneler üzerinde deneyler yürütülmüştür. 100 kPa düşey gerilme altında konsolide edilerek hazırlanmış 6 mm uzunlukta bazalt fiber katkılı örnekler üzerinde yürütülen UU deneyleri sonucunda tüm karışımlar arasında en yüksek dayanım artışı %59,89 kPa ile %1,5 bazalt fiberli karışımda (300 kPa hücre basıncı) elde edilmiştir. 12 mm uzunluğu için en yüksek dayanım artışı %74,78 ile %1,5 bazalt fiberli karışımda (300 kPa hücre basıncı), 24 mm uzunluğu için ise en yüksek dayanım artışı %88,63 ile %1,5 bazalt fiberli karışımda (400 kPa hücre basıncı) elde edilmiştir.

200 kPa düşey gerilme altında konsolide edilerek hazırlanmış 6 mm uzunlukta bazalt fiber katkılı örnekler üzerinde yürütülen UU deneyleri sonucunda tüm karışımlar arasında en yüksek dayanım artışı %29,23 kPa ile %1,5 bazalt fiberli karışımda (300 kPa hücre basıncı) elde edilmiştir. 12 mm uzunluğu için en yüksek dayanım artışı %38,46 ile %1,5 bazalt fiberli karışımda (300 kPa hücre basıncı), 24 mm uzunluğu için ise en yüksek dayanım artışı %43,09 ile %1,5 bazalt fiberli karışımda (200 kPa hücre basıncı) elde edilmiştir.

300 kPa düşey gerilme altında konsolide edilerek hazırlanmış 6 mm uzunlukta bazalt fiber katkılı örnekler üzerinde yürütülen UU deneyleri sonucunda tüm karışımlar arasında en yüksek dayanım artışı %49,04 kPa ile %1,5 bazalt fiberli karışımda (200 kPa hücre basıncı) elde edilmiştir. 12 mm uzunluğu için en yüksek dayanım artışı %72,10 ile %1,5 bazalt fiberli karışımda (100 kPa hücre basıncı), 24 mm uzunluğu için ise en yüksek dayanım artışı %63,70 ile %1,5 bazalt fiberli karışımda (100 kPa hücre basıncı) elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlardan bazalt fiber yüzdesinin silt zeminin drenajsız kayma direnci üzerinde doğrudan etkisi bulunduğu ortaya konmuştur. Bazalt fiber oranı oldukça az olduğunda, verimli bir fiber-zemin ağı oluşmamaktadır. Bazalt fiber içeriği giderek arttığında, fiber aralığı azalmakta, böylece bitişik fiber-zemin kolonları etkili bir fiber-zemin ağı oluşturmak üzere kolayca kesişmektedir. Bu durumda zemin bir dış kuvvete tabi tutulduğunda, bir bütün olarak hareket eden zemin ve fiber iskeleti nedeniyle, kuvvet fiber-zemin ağı ve zemin partikülleri arasında kolayca transfer edilmektedir. Bununla birlikte, bazalt fiber oranı optimum değeri aştığında, deney sonuçları iyileştirme etkisinin daha iyi olmadığını göstermektedir. Bazalt fiber içeriği oldukça fazla olduğunda, fiberler zemin içinde kümeler halinde toplanmakta ve bu da fiberlerin eşit dağılımını zorlaştırmaktadır. Bu da, fiber takviyesinin zemin üzerindeki etkisini azaltmaktadır.

Sonuçlar, bazalt fiber oranı yanında fiber uzunluğunun da iyileştirme miktarında çok önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Bazalt fiberler çok kısa olduğunda, numune içinde oluşan fiber-zemin kolonları da çok kısa kalmaktadır. Zemin-fiber kolonları

arasındaki temas düşük olup gerilme iletimi zorlaşmakta ve fiber-zemin ağı etkili bir şekilde oluşturulamadığından bazalt fiberler ile zemin partikülleri arasında kolayca kayma gerçekleşebilmektedir. Bu nedenle, iyileştirme etkisini etkili bir şekilde görmek zor olmaktadır. Buna göre fibersiz zemine kıyasla, güçlendirilmiş zeminin mukavemeti pek fazla artmamaktadır. Bununla birlikte, optimum bazalt fiber oranı belirlendiğinde, bazalt fiberlerinin uzunluğu arttıkça fiberler ve zemin partikülleri arasındaki temas alanı artmakta, fiber-zemin ağı daha etkili bir şekilde oluşturulabildiğinden gerilmelerin iletilmesi kolaylaşmaktadır.

Doğun olmayan durumda katkısız ve katkılı numunelerde gevrek kırılmaya işaret eden kayma yüzeyleri görülürken, kırılmada boy değişimi değerleri, fiber katkısının numunelere esneklik kazandırdığını ortaya koymuştur.

Doğun numunelerde katkısız olanların bir kısmında kayma yüzeyleri görülürken, bazalt fiber katkılı numunelerde ise dayanım artışı deformasyonla birlikte devam etmiş ve numunelerin hiçbirinde kırılma yüzeyi gelişmemiştir. Doğun numunelerde numunelerin fiber takviyeli olup olmamasına bakılmaksızın hemen hepsinde maksimum gerilme değerleri için %20'ler civarında boy değişimlerinin gerçekleşmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Burada dikkat çeken konu numunelerin birçoğunda belli bir deformasyon oranına kadar fiber etkisinin açık bir şekilde görülmemesi, bunun ötesinde ise bazalt fiberlerin dayanıma katkısının belirgin bir şekilde ortaya çıkmasıdır.

Bazalt fiber, numunelerin doğun olup olmaması farketmeksizin her iki durumda da üzerinde UU deneyi yürütülen tüm numunelerde elde edilen deviatör gerilmeyi dolayısıyla kayma direncini yükseltmiştir. Tüm fiber boyları için %1.5 katkı oranının maksimum artışı sağladığı, ayrıca dayanımdaki maksimum artışın 24 mm boyundaki fiberlerde gerçekleştiği ortaya konmuştur. Ayrıca gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin şeklinden dayanımdaki artışların sabit oranlarda olmadığı görülmekte olup, bunun nedeni de bazalt fiberin siltli zemine rastgele karıştırılması olarak görülmektedir. Sonuç olarak bu doktora tez çalışmasında bazalt fiberin kullanılageldiği beton yanında zemin özelliklerini iyileştirmede de alternatif olabileceği ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

- ACI, 2002. State-of-the-art report on fiber reinforced concrete, ACI 544.1R-96, USA.
- Aggarwal, P., Sharma, B. 2011. Application of jute fiber in the improvement of subgrade characteristics. ACEEE Int. J. on Transportation and Urban Development, 1(1): 56-58.
- Ahmad, F., Bateni, F., Azmi, M. 2010. Performance evaluation of silty sand reinforced with fibers. Geotextiles and Geomembranes, 28(1): 93-99.
- Akbulut, S., Arasan, S., Kalkan, E. 2007. Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers. Applied Clay Science, 38(1-2): 23-32.
- Akıncı, A. 2009. Mechanical and morphological properties of basalt filled polymer matrix composites. Archives of Material Science and Engineering, 35(1): 29-32.
- Al-Rawas, A.A., Hago, A.W., Al-Sami, H. 2005. Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. Building and Environment, 40(5): 681-687.
- 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.
- Ataşalar, O., Canatan, H.O., Monkul, M.M., Aksoy, Y.Y. 2015. İzmir Körfezi Tarama Zemininin Kireç ve Uçucu Kül ile Stabilizasyonu, 6. Geoteknik Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Bildiri No: S052, Adana.
- 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.
- Beycioğlu, A., Aruntaş, Y. 2014. Bazalt lifli donatının yüksek dayanımlı betondaki aderans performansı. Mühendislik ve Bartın Üniversitesi Teknoloji Bilimleri Dergisi, 2(1): 83-96.

- Borhan, T.M. 2012. Properties of glass concrete reinforced with short basalt fibre. *Materials and Design*, 42: 265–271.
- Borhan, T.M. 2013. Thermal and mechanical properties of basalt fibre reinforced concrete. *Intern. J. of Civil and Environmental Engineering*, 7(4): 334-337.
- 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.
- Coduto, D.P. 1998. *Geotechnical Engineering: Principles and Practices*, Prentice Hall, Dallas, USA.
- Colombo, C., Vergani, L., Burman, M. 2011. Static and fatigue characterization of basalt fiber reinforced composites. 16th International Conference on Composite Structures: ICCS 16, #308.
- Consoli, N.C., Casagrande, M.D., Coop, M.R. 2005. Effect of fiber reinforcement on the isotropic compression behavior of sand. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 131(11): 1434-1436.
- Correia, A.A.S., Oliveira, P.J.V., Custodio, D.G. 2015. Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil. artificially stabilised with binders, *Geotextiles and Geomembranes*, 43(2): 97-106.
- Cömert, A.T., Ural, N. 2015. Mermer tozunun kil zemin özelliklerine ve CBR'a etkisi. 6. Geoteknik Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Bildiri No: S047, Adana.
- 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.
- Dhouib, A., Magnan, J.-P., Guilloux, A. 2004. Soil improvement techniques: history, geotechnical investigations, applications and economical data. ASEP-GI 2004 - Vol. 2 Magnan (ed.), Presses de l'enpc/LCPC, Paris, 577-598.
- Dias, P.D., Thaumaturgo, C. 2005. Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers. *Cement&Concrete Composites*, 27: 49-54.
- 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.

- Gao, L., Hu, G., Xu, N., Fu, J., Xiang, C., Yang, C. 2015. Experimental study on unconfined compressive strength of basalt fiber reinforced clay soil. *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 561293.
- Ghabaee, S., Şenol, A., Yıldırım, H. 2015. Kireç ile stabilize edilmiş betonitin kür süresinin mukavemet üzerindeki etkisi. 6. Geoteknik Sempozyumu, *Bildiriler Kitabı*, Bildiri No: S050, Adana.
- Gisymol, P.G., Ramya, K. 2017. Enhancing the compressive strength of inorganic soil using basalt fiber. *International Conference on Geotechniques For Infrastructure Projects*, Thiruvananthapuram.
- Gümülçine, 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.
- Gürsoy, Z., Başarı, E., Durukan, S. 2015. Körfez bölgesi çökelmiş zeminlerin kireç ve çimento ile ıslahı. 6. Geoteknik Sempozyumu, *Bildiriler Kitabı*, Bildiri No: S066, Adana.
- Hassan, D.İ., Çabalar, A.F., Akbulut, N. 2015. Bir kilin atık granit kırığıyla iyileştirilmesi. 6. Geoteknik Sempozyumu, *Bildiriler Kitabı*, Bildiri No: S065, Adana.
- Hausmann, M.R. 1990. *Engineering Principles of Ground Modification*. McGraw-Hill College, NewYork, 632 pp.
- Hejazi, S.M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S.M., Zadhoush, A. 2012. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers, *Construction and Building Materials*, 30: 100-116.
- High, C., Seliem, H.M., El-Safty, A., Rizkalla, S.H. 2015. Use of basalt fibers for concrete structures. *Construction and Building Materials*, 96: 37-46.
- Holtz, R.D., Kovacs, W.D. 1981. *An introduction to geotechnical engineering*. Prentice Hall.
- 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.

- Kızılkant, A.B., Kabay, N., Akyüncü, V., Erdoğan, G. 2014. Bazalt lifler ve basalt lifli betonların mekanik özellikleri. *Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 32(4): 444-452.
- Kim, Y.T., Kim, H.J., Lee, G.H. 2008. Mechanical behavior of lightweight soil reinforced with waste fishing net. *Geotextiles and Geomemb.* 26(6): 512-518.
- Kumar, S., Tabor, E. 2003. Strength characteristics of silty clay reinforced with randomly oriented nylon fibers. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 8-Bundle B.
- Kumar, A., Walia, B.S., Mohan, J. 2006. Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay. *Construction and Building Materials*, 20(10): 1063-1068.
- 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.
- Majumdar, A.J. 1975. Properties of fiber cement composites. *Proceedings, RILEM Symp., Construction Press, Lancaster, London*, 279-314.
- Mali, S., Singh, B. 2014. Strength behaviour of cohesive soils reinforced with fibers. *International Journal of Civil Engineering Research*, 5(4): 353-360.
- Nicholson, P.G., Kashyap, V., Fujii, C.F. 1994. Lime and fly ash admixture improvement of tropical Hawaiian soils. *Transportation Research Record*, 1440: 71-78.
- Önalp, A., Sert, S. 2016. *Geoteknik Bilgisi III Bina Temelleri, Güncelleştirilmiş 3. Baskı*, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- 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.
- Parker, D.G., Thorton, S., Cheng, C.W., 1977. Permeability of fly ash stabilized soils. *Proc. of the Speciality Conference of the Geotechnical Eng. Division, ASCE Geotechnical Practise for Disposal of Solid Waste Materials Michigan*, 63-70.

- 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.
- Prabakar, J., Sridhar, R.S. 2002. Effect of random inclusion of sisal fiber on strength behaviour of soil. *Construction and Building Materials*, 16(2): 123-131.
- Ravishankar, U., Raghavan, S. 2004. Coir stabilised lateritic soil for pavements. In: *Indian Geotech Conf.*, 1381–1386.
- Ross, A. 2006. Basalt fibers: a new alternative to glass? *Condensed info from Composites Technology/Composites World*: August 2006.
- Saravanan, D. 2006. Spinning the rocks - basalt fibers. *IE(I) Journal-TX.*, 86: 39-45.
- Segetin, M., Jayaraman, K., Xu, X. 2007. Harakeke reinforcement of soil–cement building materials: Manufacturability and properties. *Building and Environment* 42(8): 3066-3079.
- Seis M., Beycioğlu A. 2015. Bond performance of basalt fiber-reinforced polymer bars in conventional portland cement concrete: A relative comparison with steel rebar using the hinged beam approach. *Science and Engineering of Composite Materials*. 25(6): 909-918.
- Shin, E.C., Das, B.M. 1998. Ultimate bearing capacity of strip foundation on geogrid-reinforced clay slope. *KSCE J. of Civil Engineering*, 2(4): 481-488.
- Sim, J., Park, C., Moon, D.Y. 2005. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Composites, Part B*, 36(6-7): 504-512.
- Swink, M. 2002. Continuous filament basalt: a unique fiber capable of leadership in high temperature applications. *Techtextil North America Symposium*. Atlanta, GA, USA, 1-16.
- Sukontasukkul, P., Jamsawang, P. 2012. Use of steel polypropylene fibers to Improve flexural performance of deep soil-cement column. *Construction and Building Materials*, 29: 201-205.
- Tang, C.-S., Shi, B., Cui, Y.J., Liu, C., Gu, K. 2012. Desiccation cracking behavior of polypropylene fiber-reinforced clayey soil. *Canadian Geotechnical Journal*. 49(9): 1088–1101.
- 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.
- Uzomaka, O.J. 1976. Characteristics of akwara as reinforcing fiber. Magazine of Concrete Research, 28(96): 162-167.
- Yıldırım, S. 2009. Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı, 3. Basım, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Yıldız, S., Bölükbaş, Y., Keleştemur, O. 2010. Cam elyaf katkısının betonun basınç ve çekme dayanımı üzerindeki etkisi. Politeknik Dergisi, 13(3): 239-243.
- Yılmaz, Y., Sevcen, 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.
- Zaimoğlu, A.Ş. 2010. The optimization of unconfined compressive strength on fine grained soils modified with polypropylene fibers and additive materials. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi, İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul, 321-326.
- Zuheir, K., Ali, F.K., Nurullah, A. 2015. Biyopolimer katkılı bir kil örneğinin kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri ile incelenmesi. 6. Geoteknik Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Bildiri No: S067, Adana.

ÖZGEÇMİŞ

Cyrille Prosper NDEPETE, 25.06.1981 tarihinde Orta Afrika Cumhuriyeti'nin başkenti Bangui'de doğdu. İlkokul, ortaokul ve lise öğrenimini Bangui'de tamamladı. 2004 yılında Bangui Complexe Scolair CPJ Lisesi'nden mezun oldu. 2004 yılında başladığı Bangui Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nden 2007 yılında mezun oldu. 2012 yılında aynı üniversitede Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2013 yılında Türkiye Bursları başvurusunu kazanarak Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Bilim Dalı'nda Doktora öğrenimine başladı. Evli ve iki çocuk babasıdır.