

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

**YÜKSEK PERFORMANSLI POLİPROPİLEN FİBER
KATKISININ KİL ZEMİNİN DRENAJSIZ KAYMA
DİRENCİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatih KÜÇÜK

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

Ocak 2021

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

**YÜKSEK PERFORMANSLI POLİPROPİLEN FİBER
KATKISININ KİL ZEMİNİN DRENAJSIZ KAYMA
DİRENCİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatih KÜÇÜK

**Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK**

Bu tez 29/01/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

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.

Fatih KÜÇÜK

29.01.2021

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam sürecinde benimle her konuda bilgi ve deneyimlerini paylaşan, deneylerimde her türlü olanağı sağlayan, geoteknik alanında yüksek lisans yapmaya teşvik eden ve tamamlanmasında en büyük yer sahibi olan değerli hocam Doç. Dr. Sedat SERT'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Doç. Dr. Ertan BOL ve Doç. Dr. Aşkın ÖZOCAK hocalarıma, Arş. Gör. Kadir KOCAMAN ve Arş. Gör. Mustafa ÖZSAĞIR'a, laboratuvar çalışmalarımda yardımcı olan Tekniker Recep EYÜPLER ve Sebahattin İŞ'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her alanında maddi ve manevi destek sağlayan, sayısız fedakârlık yapan, iyi bir birey olarak yetişmem için gayret gösteren aileme teşekkür ederim.

Ayrıca tüm imkânlarını sağlayan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen İnş. Müh. Eyüp ÇALIŞKAN ve ailesine, İnş. Müh. Yunus CANTÜRK ve ailesine, İnş. Müh. Enes BEYAZ ve ailesine, İnş. Müh. Erdem KAYA'ya, İnş. Yük. Müh. Abdullah FİLİZ'e, Faruk EREN'e ve Tunahan BİLDİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Deney çalışmalarımda katkı malzemesi olarak kullandığım yüksek performanslı polipropilen fiberi tarafımıza bedelsiz olarak veren KORDSA TEKNİK TEKSTİL A.Ş.'ye teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
SUMMARY	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
KATKI MALZEMELERİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRME.....	3
VE FİBER KATKISI	3
2.1. Zemin İyileştirme	3
2.2. Zemin İyileştirme Yöntemleri	5
2.2.1. Uygulama derinliğine göre zemin iyileştirme yöntemleri	6
2.2.1.1. Derin zemin iyileştirme yöntemleri	6
2.2.1.2. Yüzeysel zemin iyileştirme yöntemleri.....	6
2.3. Elyaf lar (Fiberler).....	7
2.3.1. Doğal fiberler.....	8
2.3.2. Yapay fiberler	9
2.4. Katkı Malzemeleri ile Zemin İyileştirme Çalışmaları.....	10
2.5. Fiberlerin Katkı Malzemesi Olarak Kullanıldığı Çalışmalar	15
2.5.1. Doğal fiberlerin kullanıldığı çalışmalar.....	15

BÖLÜM 3.

POLİPROPİLEN VE POLİPROPİLEN FİBERLER	19
3.1. Polipropilenin Tarihçesi	19
3.1.1. Polipropilenin kullanım alanları	20
3.2. Polipropilen Fiber Katkısı ile Zemin İyileştirme Çalışmaları	21

BÖLÜM 4.

MALZEMELER VE METOT	25
4.1. Malzemeler	25
4.1.1. Kil zemin	25
4.1.2. Polipropilen fiber	27
4.2. Deneysel Çalışmanın Amacı ve İçeriği	30
4.2.1. Atterberg limitleri	33
4.2.1.1. Likit limit	33
4.2.1.2. Plastik limit	35
4.2.2. Kompaksiyon deneyi ve hesaplamaları	37
4.2.3. Serbest basma deneyi ve hesaplamaları.....	38
4.3. Serbest Basma Deneyi için Uygun Numune Hazırlama Aşamaları	40
4.3.1. Sıkıştırma kalıbı karışım hesaplamaları.....	41
4.3.2. Sıkıştırma kabına uygulanacak enerjinin hesaplanması	43

BÖLÜM 5.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	46
5.1. Kilin ve Polipropilen Fiberin Mineral ve Mikro Yapı Özellikleri	46
5.2. Serbest Basma Deneyinde Makroskobik Davranış	48
5.3. Serbest Basma Deneyinde Elde Edilen Sonuçlar	49
5.3.2. Serbest basma deneyi ile elde edilen Mohr Çemberleri	65

BÖLÜM 6.

SONUÇ VE ÖNERİLER	76
KAYNAKLAR	80
ÖZGEÇMİŞ	84

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A_0	: Numune ilk alanı
A	: Düzeltilmiş alan
c	: Kohezyon
CBR	: Kalifornia taşıma oranı (California bearing ratio)
CI	: Orta plastisiteli kil
E	: Enerji
e	: Boşluk oranı
ε	: Düşey birim boy değişimi
G_s	: Özgül ağırlık
H	: Numune boyu
I_p	: Plastisite indisi
n	: Porozite
P	: Yük
PP	: Polipropilen
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu (Scanning electron microscope)
S_r	: Doygunluk derecesi
UC	: Serbest basma deneyi (Unconfined compression test)
UU	: Konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyi
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
σ	: Toplam normal gerilme
γ_w	: Suyun birim hacim ağırlığı
γ_{kmax}	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık
γ_n	: Yaş birim hacim ağırlık
τ_{max}	: Kayma direnci



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Dane boyutlarına göre zemin iyileştirme yöntemleri.....	6
Şekil 2.2. Yapay Polimer Grupları.....	9
Şekil 3.1. Polipropilen ve polipropilenin monomer modeli.....	19
Şekil 4.1. 4 nolu elekten elenen kil zemin	26
Şekil 4.2. Kil zeminin dane dağılım eğrisi.....	26
Şekil 4.3. Polipropilen fiberin görünümü.....	28
Şekil 4.4. KraTos Makronun beton içerisinde homojen dağılımı.....	29
Şekil 4.5. Polipropilen fiber (KraTos Makro) ve çelik hasırın beton içerisindeki görünümü	29
Şekil 4.6. Polipropilen fiberin 3 noktalı kiriş ve plaka testi.....	29
Şekil 4.7. Casagrande yöntemi ile likit limit bulunması (a) Casagrande cihazına zeminin yatay konulması (b) oluğun (yarığının) görünümü (c) Casagrande cihazı kabının saniyede 2 tur ile döndürülmesi.....	33
Şekil 4.8. Koni deneyi (a) zeminin metal kaba sıkıca yerleştirilmesi, (b) koni ucunun zeminin yüzünü belirsizce çizecek seviyeye indirilmesi, (c) 3 farklı noktada koninin batırılması, (d) koninin serbest düşürülmesi.	34
Şekil 4.9. Casagrande deneyi likit limit sonucu.....	35
Şekil 4.10. Düşen koni deneyi likit limit sonucu	35
Şekil 4.11. Kil zeminin plastisite kartında gösterimi	36
Şekil 4.12. Kompaksiyon deneyi	37
Şekil 4.13. Kuru birim hacim ağırlık su muhtevası grafiği.....	38
Şekil 4.14. Polipropilen fiberlerin istenilen uzunluklarda kesilmesi	40
Şekil 4.15. Kompaksiyon kalıbından tüpe alınan numuneler	41
Şekil 4.16. Çelik tüpe numune alımı sırasında örselenen silindirik numuneler.....	41
Şekil 4.17. 3,50 cm çap, 7,00 cm yüksekliğe sahip sıkıştırma kalıbı	42
Şekil 4.18. İki kalıbın birlikte görünüşü	42

Şekil 4.19. Sıkıştırma kalıbında numunelerin hazırlanması.....	43
Şekil 4.20. Sıkıştırma kalıbında numune sıkıştırılması.....	45
Şekil 5.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	46
Şekil 5.2.Kil zeminin mikroskobik yapısı (x100, x1000, x2000 ve x5000)	47
Şekil 5.3. Polipropilen fiberin mikroskobik yapısı (x50, x500, x1000 ve x2000)...	47
Şekil 5.4. Silindirik numunelerin serbest basma sonrası oluşan kırılma yüzeyleri..	48
Şekil 5.5. 300 adet silindirik numune.....	48
Şekil 5.6. 3,5 cm çaplı doğal zemin numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafığı	55
Şekil 5.7. %0,5 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafığı (Çap: 3,5 cm)	55
Şekil 5.8. %1 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafığı (Çap: 3,5 cm)	55
Şekil 5.9. %1,5 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafığı (Çap: 3,5 cm)	56
Şekil 5.10. %2 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafığı (Çap: 3,5 cm)	56
Şekil 5.11. %0,5 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafığı (Çap: 3,5 cm)	56
Şekil 5.12. %1 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafığı (Çap: 3,5 cm)	57
Şekil 5.13. %1,5 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafığı (Çap: 3,5 cm)	57
Şekil 5.14. %2 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafığı (Çap: 3,5 cm)	57
Şekil 5.15. 5,0 cm çaplı doğal kil numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafığı....	58
Şekil 5.16. %0,5 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafığı (Çap: 5,0 cm)	59
Şekil 5.17. %1 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafığı (Çap: 5,0 cm)	59
Şekil 5.18. %1,5 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafığı (Çap: 5,0 cm)	59

Şekil 5.19. %2 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).....	60
Şekil 5.20. %0,5 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).....	60
Şekil 5.21. %1 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).....	60
Şekil 5.22. %1,5 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).....	61
Şekil 5.23. %2 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).....	61
Şekil 5.24. %0,5 oranında 30 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).....	61
Şekil 5.25. %1 oranında 30 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).....	62
Şekil 5.26. %1,5 oranında 30 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).....	62
Şekil 5.27. %2 oranında 30 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).....	62
Şekil 5.28. %0,5 oranında 40 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).....	63
Şekil 5.29. %1 oranında 40 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).....	63
Şekil 5.30. %1,5 oranında 40 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).....	63
Şekil 5.31. %2 oranında 40 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).....	64
Şekil 5.32. %0,5 oranında 50 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).....	64
Şekil 5.33. %1 oranında 50 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).....	64
Şekil 5.34. %1,5 oranında 50 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).....	65

Şekil 5.35. %2 oranında 50 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).....	65
Şekil 5.36. 3,5 cm (sol) ve 5,0 cm (sağ) çaplı doğal zemin numunelerinde Mohr çemberleri.....	66
Şekil 5.37. %0,5 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 3,5 cm).....	66
Şekil 5.38. %1 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 3,5 cm).....	66
Şekil 5.39. %1,5 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 3,5 cm).....	66
Şekil 5.40. %2 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 3,5 cm).....	67
Şekil 5.41. %0,5 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 3,5 cm).....	67
Şekil 5.42. %1 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 3,5 cm).....	67
Şekil 5.43. %1,5 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 3,5 cm).....	67
Şekil 5.44. %2 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 3,5 cm).....	68
Şekil 5.45. %0,5 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).....	68
Şekil 5.46. %1 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).....	68
Şekil 5.49. %0,5 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).....	69
Şekil 5.50. %1 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).....	69
Şekil 5.51. %1,5 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).....	69
Şekil 5.52. %2 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).....	70

Şekil 5.53. %0,5 oranında 30 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).....	70
Şekil 5.54. %1 oranında 30 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).....	70
Şekil 5.55. %1,5 oranında 30 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).....	70
Şekil 5.56. %2 oranında 30 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).....	71
Şekil 5.57. %0,5 oranında 40 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).....	71
Şekil 5.58. %1 oranında 40 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).....	71
Şekil 5.59. %1,5 oranında 40 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).....	71
Şekil 5.60. %2 oranında 40 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).....	72
Şekil 5.61. %0,5 oranında 50 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).....	72
Şekil 5.62. %1 oranında 50 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).....	72
Şekil 5.63. %1,5 oranında 50 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).....	72
Şekil 5.64. %2 oranında 50 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).....	73
Şekil 5.65. Dayanım - fiber uzunluğu ilişkisi	73
Şekil 5.66. Dayanım - fiber oranı ilişkisi	74
Şekil 5.68. Dayanım artışı - fiber oranı ilişkisi	75

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Fiber çeşitleri (Aral, 2006).....	7
Tablo 2.2. Farklı fiber çeşitlerinin özellikleri (Kurt, 2006).	8
Tablo 4.1. Kıl zeminin fiziksel özellikleri	26
Tablo 4.2. Polipropilen fiberin fiziksel ve mekanik özellikleri (URL-5)	28
Tablo 4.3. KraTos Makronun özellikleri (URL-5).....	28
Tablo 4.4. Numunelerin çapı, fiber ağırlığı, fiber boyu ve oranları.....	32
Tablo 5.1. Serbest basma deneyi silindirik numunelerinde ortalama fiziksel özellikler	49
Tablo 5.2. Serbest basma deneylerinde dayanım ve kırılmada deformasyon değerleri (Çap: 3,50 cm).....	50
Tablo 5.3. Serbest basma deneylerinde dayanım ve kırılmada deformasyon değerleri (Çap: 5,00 cm).....	52
Tablo 5.4. Numunelerin dayanımlarında fiber katkısı ve değişim oranları	53

ÖZET

Anahtar kelimeler: Kil, serbest basma deneyi, drenajsız kayma direnci, zemin iyileştirmesi, polipropilen fiber.

Günümüzde hızla büyüyen şehirleşme ile yeni yerleşim bölgelerinin zemin özellikleri açısından problemli yerlerde oluşturulması kaçınılmaz hale gelmiştir. Yumuşak killi zeminlerde inşa edilen binalar ve ulaştırma yapılarında taşıma gücü ve oturma problemleri önemli yer tutmaktadır. Bu gibi durumlarda parseli terketme veya güzergahı değiştirme, zemin iyileştirmesi yapma veya binalarda kazıklı temel inşa etme gibi yöntemler alternatif olarak kullanılmaktadır. Gelişen teknoloji ile geosentetik malzemeler taşıma gücünü artırma, tabakaları ayırma, drenaj gibi işlemler için kullanılmaktadırlar. Geosentetiklerden birisi olan polipropilen fiberler uzun yıllardır beton ve zemin güçlendirilmelerinde kullanılmaktadır. Bunun yanında alkali özellikte olan betonun alkali direnci olmayan fiberleri zamanla çürüttüğü ve uzun vadeli dayanımını azalttığı bilinmektedir. Bu dezavantajı kaldırmak için alkali dirençli fiberler üretilmiştir.

Bu tez çalışmasında alkali ve korozyon direnci yüksek olan, sürtünme özelliği artırılmış polipropilen fiber katkısının kil zeminin drenajsız kayma direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Öncelikli olarak Kocaeli ilinden getirilen kil zeminin fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra 40 mm ve 54 mm uzunluğunda imal edilmiş fiberler 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm ve 50 mm boylarında kesilmiştir. Bu fiberler optimum su muhtevasında bulunan doğal zemine kuru ağırlığın %0,5, %1, %1,5 ve %2'si oranlarında eklenerek fiber-zemin karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar, standart Proktor enerjisinin 2 katına karşılık gelen sabit bir enerji ile iki farklı boyuttaki silindirik numune kalıpları içine sıkıştırılmıştır. Kalıplardan birisi 3,50 cm çap ve 7,00 cm yüksekliğe sahip iken diğerrinin çapı 5,00 cm ve yüksekliği de 10,00 cm'dir. Çalışmada 20 tanesi doğal kil ve 280 tanesi polipropilen fiber katkılı olmak üzere toplamda 300 tane silindirik numuneye serbest basma (UC) deneyi yapılmıştır. Kil zemin ve polipropilen fiberle güçlendirilmiş numunelerin makroskobik görüntüleri ve mikro yapısı arasındaki etkileşimi incelemek için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile analiz yapılmıştır.

Yapılan 300 adet serbest basma deneyi sonucunda polipropilen fiber katkısının kil zeminin drenajsız kayma direncini arttırdığı görülmüştür. Maksimum direnç artışı, kuru ağırlıkça %2 oranında 30 mm uzunluğunda fiber katkısı olan karışımlarda elde edilmiştir. Ayrıca polipropilen fiberin boyutları nedeniyle fiber oranı ve uzunluğu arttıkça homojen karışım elde edilmesi zorlaştırmıştır.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF HIGH PERFORMANCE POLYPROPYLENE FIBER ADDITIVE ON THE UNDRAINED SHEAR STRENGTH OF CLAY SOIL

SUMMARY

Keywords: Clay, Unconfined compression test, undrained shear strength, soil improvement, polypropylene fiber.

Today, with the rapidly growing urbanization, it has become inevitable to create new residential areas in problematic areas in terms of soil characteristics. Bearing capacity and settlement problems have an important role in buildings and transportation structures built on soft clay soils. In such cases, methods such as leaving the parcel or changing the route, soil improvement or piled foundations in buildings are used as alternatives. With the developing technology, geosynthetic materials are used for processes such as increasing the bearing capacity, separating the layers, and drainage. Polypropylene fibers, one of the geosynthetics, have been used in concrete and soil reinforcement for many years. In addition, it is known that concrete with alkali properties decays non-alkali-resistant fibers over time and reduces its long-term strength. To eliminate this disadvantage, alkali resistant fibers have been produced.

In this thesis study, the effect of polypropylene fiber additive with high alkali and corrosion resistance and increased friction properties on the undrained shear strength of the clay soil was investigated. First of all, physical properties of clay soil taken from Kocaeli province were determined. Then, 40 mm and 54 mm long manufactured fibers were cut into 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm and 50 mm lengths. Fiber - soil mixtures were prepared by adding 0,5%, 1%, 1,5% and 2% of the dry weight to the natural soil with optimum water content. The prepared mixtures were compacted into cylindrical sample molds of two different sizes with a constant energy corresponding to 2 times the standard Proctor energy. One of the molds has a diameter of 3.50 cm and a height of 7.00 cm, while the other has a diameter of 5.00 cm and a height of 10.00 cm. In the study, unconfined compression (UC) tests were carried out on a total of 300 cylindrical samples, 20 of which were natural clay and 280 of which were polypropylene fiber reinforced. Analysis was performed by Scanning Electron Microscopy (SEM) to examine the interaction between the macroscopic images and microstructure of clay soil and polypropylene fiber reinforced samples.

As a result of 300 unconfined compression tests, it was observed that polypropylene fiber additive increased the undrained shear strength of the clay soil. The maximum strength increase was obtained in mixtures with a fiber additive of 30 mm length at 2% by dry weight. In addition, due to the dimensions of the polypropylene fiber, it became difficult to obtain a homogeneous mixture as the fiber ratio and length increased.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Son yıllarda hızla artan nüfus yeni barınma alanlarına olan ihtiyacı artırmaktadır. Bunun yanında yoğun nüfuslu şehirlerde yeni binaların inşası için mevcut arsaların yetersiz kaldığı, yeni yerleşim alanlarının bulunmasının ve bunlara ait ulaşım yapılarının inşaatının zorunlu hale geldiği görülmektedir. Bu durum inşaat sektörünü sürekli büyütmekte, artan yapı yükleri ve proje büyüklükleri nedeniyle yapıların geoteknik açıdan uygun olmayan arsalar da inşa edilme zorunluluğu doğmaktadır.

Kullanım amacı, malzeme kalitesi, zemin özellikleri yapıların tasarımına etki eden faktörler olmakla birlikte imalatların ekonomik olması da istenen şartlar arasında yer almaktadır. Yapı tasarlanırken dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan birisi, zeminin özelliklerinin yapıdan gelen yükleri karşılayacak kapasite olup olmadığıdır. Mevcut zeminin yapıdan gelen yükleri taşıma gücü ve oturma kriterleri açısından karşılayamadığı durumlarda zemin iyileştirme metotları gündeme gelebilmektedir. Günümüzde gelişen teknoloji çeşitli yöntemlerle zemin iyileştirmesi yapılmasına olanak sunmaktadır. Bu yöntemlerden birisi zemine doğal ve yapay fiberlerin katkı maddesi olarak eklenmesi suretiyle zeminin çeşitli özelliklerinin iyileştirilmesidir. Doğal ve yapay fiberler inşaat sektöründe birçok alanda etkin olarak kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, yüksek performanslı polipropilen fiber katkısının kil zeminin drenajsız kayma direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmaların tamamı Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarında yürütülmüştür.

Çalışmada, Kocaeli ilinden getirilen kil zemin ve Kordsa Teknik Tekstil A.Ş tarafından üretilen yüksek performanslı polipropilen fiber kullanılmıştır. Deneysel çalışmada öncelikle kil zeminin fiziksel özellikleri bulunmuştur.

Kompaksiyon deneyleri ile kil zeminin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı bulunduğundan sonra optimum su muhtevasında hazırlanmış kil zemine 10 mm - 20 mm - 30 mm - 40 mm ve 50 mm uzunluğundaki polipropilen fiberler %0,5 - %1 - %1,5 ve %2 oranında eklenerek karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar standart Proktor enerjisinin 2 katına karşılık gelen sabit bir enerji ile iki farklı boyutta silindirik sıkıştırma kalıbında sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan silindirik numunelerin drenajsız kayma dirençlerini bulmak için serbest basma deneyleri yapılmıştır.



BÖLÜM 2. KATKI MALZEMELERİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRME VE FİBER KATKISI

2.1. Zemin İyileştirme

Günümüzde gerçekleşen nüfus artışı ile birlikte kentleşme ve sanayileşme de hızla artarak mevcut yapı alanlarının azalmasına sebep olmuştur. Bu durum sonrasında yeni yapıların yapılaşmaya uygun olmayan zeminler üzerinde inşa edilmesi zorunluluğu doğmuştur. Bu gelişmeye paralel olarak yapılaşmaya uygun olmayan zayıf zeminler üzerinde çeşitli yöntemler ve teknikler ile zemin iyileştirmesi yapılmaya başlanmıştır.

İnşa edilen yapıların temellerinin üst yapıdan aktarılan gerilmeleri zemine taşıma gücü aşılmadan ve kabul edilebilir oturmalarla aktarması gerekir. Fakat zeminler her zaman bu istenilen sonucu verecek özellikleri taşıyamayabilir. Zemin özellikleri taşıma gücü ve oturma kriterleri açısından yeterli olmadığında, aşağıdaki seçeneklerin değerlendirilmesi gündeme gelebilir:

1. Var olan zemine göre yapı temellerini tasarlamak.
2. Taşıma gücü (zayıf zemin) zemini kaldırarak, taşıma gücü yüksek zemin yerleştirmek.
3. Taşıma gücü zayıf olan zemini geçerek, taşıma gücü yüksek zemine yapı temellerini inşa etmek.
4. Zayıf zemin özelliklerini arazide uygulanacak zemin iyileştirme yöntemleri ile güçlendirmek (URL-1).

Zemin iyileştirme teknikleri, zeminlerin mühendislik özelliklerini geliştirmek için kullanılır. Bu teknikler uygulama yöntemlerine ve zemin türlerine göre değişir.

Bu yöntemler sadece üst katmanların zayıf olması durumunda değil, daha derin katmanların iyileştirilmesi gerektiğinde de kullanılabilir. Zemin iyileştirme yöntemlerinde genel olarak; zeminlerin kayma direncinin ve yüzeysel temellerin taşıma kapasitesinin arttırılması, zeminlerin büzülme ve şişme miktarının azaltılması, yapı altındaki oturmaların azaltılması, dolgular ve toprak barajlarda olası stabilite problemlerinin önlenmesi amaçlanmaktadır (Gerkuş, 2006).

Zeminin veya kayanın parametrelerini sahada gerekli mukavemet veya geçirgenlik özelliklerine dönüştüren herhangi bir değişiklik stabilizasyon olarak adlandırılır. Daneli zeminlerin stabilizasyonu, boşluk hacminin değiştirilmesinden, boşlukları dolduran malzemesinin değiştirilmesinden veya her ikisinin uygulanmasından oluşur. İnce daneli zeminlerde stabilizasyon çeşitli katkı malzemelerinin kullanılmasını ve muhtemel oturmayı tamamlamak için ön yüklemeyi gerektirir. Zemin iyileştirme yöntemleri kapsamında yeraltı suyu farklı drenaj yöntemleri ile düşürülebilir/uzaklaştırılabilir.

Zemin profiline ve şantiye için geçerli özelliklere bağlı olarak sadece bir yöntem veya birden fazla yöntemin kombinasyonunu kullanmak mümkündür.

Zemin iyileştirme yöntemleri uygulanan zeminde;

1. Kayma direnci artar.
2. Killi zeminlerin kıvamı düzelir ve kumlu zeminlerin sıkılığı artar.
3. Sıkışabilirlik azalır.
4. Şişme ve büzülme oranı düşer.
5. Geçirimsizlik azalır.
6. Borulanma potansiyeli düşer.
7. Sıvılaşma potansiyeli azalır (Sağlam, 2011).

2.2. Zemin İyileştirme Yöntemleri

İnşa edilecek yapıların taşıdıkları yükleri zemine güvenle aktarabilmeleri ve yapıları taşıyan zemin kütlelerinin kararlılıklarını koruyabilmeleri için zeminin fiziksel ve mekanik parametrelerinin yeterli özellikte olması gerekmektedir.

Zemin iyileştirmede istenilen asıl amaç, mekanik araçlarla zeminin boşluk oranının azaltılması veya katkı maddeleri ile zemin boşluklarının doldurularak zeminin güçlendirilmesidir.

Sağlamer (2011)'e göre zemin iyileştirme yöntemlerindeki amaçlar şunlardır;

1. Zayıf zeminin taşıma gücünü artırmak,
2. Oturmaları azaltıp, konsolidasyonu hızlandırmak,
3. Şev ve dolguların duraylılığını sağlamak,
4. İstinat duvarlarını sağlamlaştırmak,
5. Zeminin sıvılaşma riskini azaltmak.

Zemin iyileştirme yöntemleri başlıca üç gruba ayrılabilir. (Önalp ve Sert, 2016).

1. Geçici etkili (inşaat aşamasında uygulanan geçici yöntemler).
2. Kalıcı etkili, zemine yabancı madde eklemeyen yapılan (zemine herhangi bir katkı malzemesi karıştırmadan uygulanan yöntemler).
3. Kalıcı etkili, zemine yabancı madde veya katkı maddesi ekleyerek yapılan (Zemine katkı malzemesi karıştırarak uygulanan yöntemler).

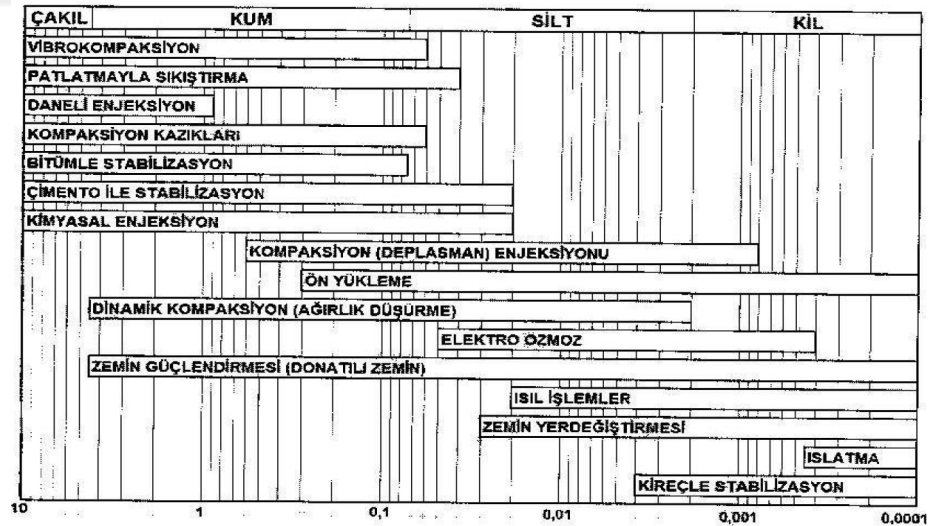
Bu tez çalışmasında kalıcı yöntem seçilmiş, kil zemine yüksek performanslı polipropilen katkı malzemesi eklenerek drenajsız kayma direncindeki değişimler incelenmiştir.

2.2.1. Uygulama derinliğine göre zemin iyileştirme yöntemleri

Zemin iyileştirme yöntemleri uygulama derinliğine göre derin zemin iyileştirme ve yüzeysel zemin iyileştirme şeklinde iki sınıfa ayrılabilir.

2.2.1.1. Derin zemin iyileştirme yöntemleri

Teknolojinin gelişmesi ve bilimsel çalışmaların artmasıyla birlikte çok sayıda derin zemin iyileştirme yöntemi ortaya çıkmıştır. Derin zemin iyileştirmede uygulanacak yöntem zemini oluşturan dane çapı ile alakalıdır. Başlıca derin zemin iyileştirme yöntemleri; kum dren, plastik dren, taş kolon, dinamik kompaksiyon (ağırlık düşürme), vibrokompaksiyon, vakumla su emme, kompaksiyon kazıkları, kireç kazıkları, ön yükleme metodu, jet grout (yüksek modüllü kolonlar), derin karıştırma, ısıtma işlemleri, patlatma metodu ve elektro-osmoz başlıkları ile sıralanabilir. Şekil 2.1.'de Mitchell ve Katti (1981) tarafından ortaya konan dane boyutuna göre zemin iyileştirme yöntemlerinin uygulanabilirliği gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Dane boyutlarına göre zemin iyileştirme yöntemleri (Mitchell ve Katti, 1981).

2.2.1.2. Yüzeysel zemin iyileştirme yöntemleri

Derin zemin iyileştirme yönteminin gerekli olmadığı durumlarda kullanılan yöntemdir.

Genel olarak üst yapı yüklerinin fazla olmadığı yapılarda ve karayolu ile demiryolu inşaatlarında kullanılır. Derin zemin iyileştirmeye göre daha düşük maliyet sebebiyle çok fazla sayıda yüzeysel zemin iyileştirme yöntemi ortaya çıkmıştır.

Bu yöntemlerden bazıları zeminlere çeşitli katkı maddeleri ilave edilerek, bazıları ise herhangi bir madde katmaksızın uygulanan yöntemlerdir.

2.3. Elyafılar (Fiberler)

Fiberler, doğal kaynaklardan elde edilen ya da insan tarafından istenilen özelliklerde endüstriyel işlemlerle üretilen esnekliğı, mukavemeti ve dayanıklılığı olan maddelerdir. Kullanım alanları ve özellikleri bakımından birçok fiber çeşidi vardır. Fiberler doğal ve yapay olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir. Doğal lifler hayvan, bitki ve mineral kaynaklı liflerdir. Yapay lifler istenilen özellikleri karşılayacak şekilde geliştirilip üretilen liflerdir (Aral, 2006). Doğal ve yapay fiber çeşitleri Tablo 2.1.'de gösterilmiştir (Aral, 2006). Farklı fiber çeşitlerine ait fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 2.2.'de sunulmaktadır (Kurt, 2006).

Tablo 2.1. Fiber çeşitleri (Aral, 2006).

Doğal Lifler			Yapay Lifler	
Bitkisel Lifler	Hayvansal Lifler	Madensel Lifler	Cam Lifler	Polimer Lifler
Akwara	Yün	Asbest	E	Akrilik
Bambu	İpek	Metal Lifler	S	Aramid
Hindistan cevizi kabuğı	Kıl	Karbon	C	Naylon
Keten, Kenevir	-	-	Cem-fil	Polyester
Jüt	-	-	-	Polietilen
Sisal	-	-	-	Polipropilen
Şeker kamışı posası	-	-	-	Poliüretan
Ahşap (Selüloz)	-	-	-	-

Tablo 2.2. Farklı fiber çeşitlerinin özellikleri (Kurt, 2006).

Lif Türü	Çekme Dayanım (MPa)	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Maksimum Uzama (%)
Akrilik	207-414	1,1	2,1	25-45
Asbestler	552-966	3,2	83-138	0,6
Pamuk	414-690	1,5	4,8	3-10
Cam	1035-3795	2,5	69	1,5-3,5
Naylon	759-828	1,1	4,1	16-20
Polyester	724-863	1,4	8,3	11-13
Polietilen	690	0,95	0,14-0,4	10
Pamuk-Yün	414-621	1,5	6,9	10-25
Mineral Yünü	483-759	2,7	69-117	0,6
Çelik	276-2760	7,8	200	0,5-35
Polipropilen	552-759	0,9	3,5	25

2.3.1. Doğal fiberler

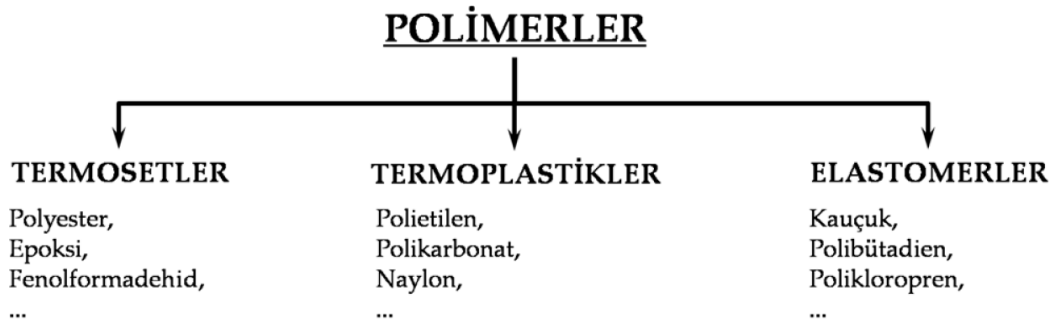
Doğal fiber, bitki, hayvan ve mineral gibi doğal kaynaklardan elde edilen ve çeşitli işlemler uygulanarak iplik, keçe ve kâğıt gibi şeylere dönüştürülen ve bu ipliklerden dokuma ve örme tekniğiyle kumaş yapımında kullanılan lif ya da kıl yapısındaki maddelerdir. Doğal bitkisel fiber çeşitleri; Pamuk, kapok, keten, kenevir, rami, jüt, bambu, muz, abaka, sisal, viskoz, kupro, modal, liyosel, rayon, kauçuk gibi liflerdir. Hayvansal fiber çeşitleri; ipek, yün, kaşmir, tiftik keçisi kılı, devetüyü vb. olarak belirtilebilir (URL-2).

Doğal fiber oluşturmada kullanılan en eski malzemeler saman ve at yelesidir. Hatta günümüzde bile Osmanlı zamanından kalma alışkanlıkla bazı cami kubbelerinde saman kullanımına rastlanmaktadır. Modern teknoloji, lifleri, çimentolu kompozitlerde kullanılan jüt ve bambu lifleri gibi, çeşitli bitkilerden daha ekonomik biçimde elde etmeyi mümkün kılmıştır. Bu liflerin en önemli özelliği, çok kolaylıkla elde edilmeleridir. Ancak bu liflerin kullanımında karşılaşılan ana sorun, bunların alkali ortamda parçalanma eğiliminde olmalarıdır (Kurt, 2006).

2.3.2. Yapay fiberler

Yapay fiberler istenilen özellikleri karşılayacak şekilde insan tarafından üretilen endüstriyel maddelerdir. Yapay fiberler genellikle polietilen, poliamid, polipropilen ve polyester gibi petrol esaslı sentetik polimerlerden üretilir. Doğal fiberlere göre kimyasal reaksiyonlara daha dayanıklı olup dayanımları da yüksektir. Polimer kökenli yapay fiberler, kolay elde edilebilmeleri ve maliyetlerinin düşük olması sebebiyle farklı sektörler yanında inşaat mühendisliği alanlarında da kullanılmaktadır.

Yapay polimerler, Utracki ve Jamieson (2010) tarafından termosetler, termoplastikler ve elastomerler olmak üzere üç gruba ayrılmışlardır. Şekil 2.2.'de bu gruplara örnekler gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Yapay Polimer Grupları (Utracki ve Jamieson, 2010).

Geoteknik mühendisliğinde zemin stabilizyonu kapsamında polyester, polimer ve polipropilen fiberlerin alternatif malzeme olarak kullanımı artmıştır. Bu tip fiberler yüksek çekme dayanımları sayesinde zemin içerisindeki gerilmeleri karşılarlar (Çetin, 2011).

Killi zeminler taşıma gücü ve toplam ve farklı oturmalar açısından zemin problemlerinin sıkça görüldüğü zeminlerdir. Killi zeminleri iyileştirmek için çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri uygulanmaktadır. Geogridler, farklı geosentetikler, çeşitli katkı malzemeleri (doğal ve yapay elyaf) kullanılarak zeminlerin fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir.

Sentetik polimer lifler çeşitleri ve uygulama alanları çok olan lif türüdür. 20. yüzyılın sonuna doğru polimer liflerde büyük ilerleme olmuştur. Sentetik polimerlerden polietilen gibi sağlam ve yüksek elastisite modülüne sahip liflerin yapılması mümkün olmuştur. Sentetik polimerik liflere polipropilen, polietilen, naylon, aramid ve perlon örnek verilebilir.

Bu tez kapsamında yürütülen deneysel çalışmanın amacı farklı oranlarda ve uzunluklarda alkali dirençli polipropilen ile güçlendirilmiş killi zemine serbest basma deneyi uygulayarak drenajsız kayma direncindeki değişimi incelemektir.

2.4. Katkı Malzemeleri ile Zemin İyileştirme Çalışmaları

Zaimoğlu ve ark. (2007), bentonit, uçucu kül ve silis dumanı malzemelerini farklı oranlarda karıştırarak enjeksiyon malzemesi hazırlamışlar ve bu karışımı çakıllı zemine enjekte ederek tek eksenli basma dayanımını araştırmışlardır. Deneyler için 3 parametrelili 4 seviyeli standart L16 ortogonal dizin seçilmiştir. Enjeksiyon karışımını, dane boyu 2-10 mm arasında değişen zeminin rölatif sıkılığı 0.70 olacak şekilde hazırlanmış çapı 10 cm, yüksekliği 20 cm olan silindirik kapta sıkıştırılmış örneklerine enjekte etmişlerdir. Enjeksiyon yapılarak hazırlanan örneklerin 7, 14 ve 28 günlük tek eksenli basma dayanımları incelenmiştir. Deney sonunda en yüksek değerler %3 bentonit, %10 uçucu kül ve %20 silis dumanının karıştırıldığı numunede elde edilmiştir. En yüksek tek eksenli basma dayanımları 7, 14 ve 28 günlük süreler için sırasıyla; 4.37 MPa, 5.86 MPa ve 8.05 MPa olarak bulunmuştur. Seçilen parametreler incelendiğinde tek eksenli basınç dayanımları (7, 14 ve 28 günlük) üzerinde en etkili parametrenin silis dumanı oranı, en az etkili parametrenin bentonit oranı olduğu görülmüştür. Ayrıca uçucu külün tek eksenli basma dayanımları (7, 14 ve 28 günlük) üzerindeki etkisinin dayanımı azaltıcı yönde olduğu sonucuna varılmıştır.

Edinçliler ve Çabalar (2009), çalışmalarında atık lastik parçaları katkılı kumun mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada atık lastik parçaları kırpıntı ve kıyılmış lastik parçaları olarak iki tipte seçilmiştir. Deneylerde iyi derecelenmiş orta sıkı kum kullanılmıştır.

Kuma kırpıntı lastik parçalarından ağırlıkça %5, %10, %20 ve %30 katılarak 20 kPa, 40 kPa ve 80 kPa düşey gerilme altında büyük boy kesme kutusunda (300 mm x 300 mm x 300 mm) kesme kutusu deneyi gerçekleştirilmiştir. Kırılmış lastik parçaları kuma ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %50 oranlarında katılarak 28 kPa, 42 kPa ve 68 kPa düşey gerilme altında küçük ölçekli kesme kutusunda (60 mm x 60 mm x 60 mm) kesme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda, kayma direnci değerlerinin artan lastik oranına göre artmadığı, optimum atık yüzdesinin lastiğin özelliklerine göre %20 - %30 arasında olduğu bulunmuştur. Kırpıntı lastik karıştırılan durumda zeminin kohezyonu 6,9 kPa'dan 25,5 kPa'a yükselerek %369, içsel sürtünme açısı 33°'den 41°'ye yükselerek %124'lük bir artış göstermiştir.

Zaimoğlu ve ark. (2009), çalışmalarında atık malzemeleriyle iyileştirilmiş B tipi dane dağılımına sahip agreganın serbest basınç değerinin değişimini araştırmışlardır. Borojips, fosfojips, silikaferrokrom ve klinker agregaya belli oranlarda eklenerek 7 günlük serbest basma dayanımına etkileri incelenmiştir. Borojips %15 - %30, fosfojips %10 - %20, silikaferrokrom %3 - %6, klinker %10 - %20 oranlarında zeminle karıştırılarak optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının belirlenmesi için standart kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırılmışlardır. Optimum su muhtevasında 10 cm çap ve 20 cm boylu silindirik kalıplarda hazırlanan numuneler 7 gün bekletildikten sonra üzerlerinde serbest basma deneyi yapılmış ve deney sonuçları, kontrol numunesine ait sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. En yüksek dayanım %15 borojips, %0 fosfojips, %3 silikaferrokrom ve %10 klinker kullanılan karışımda elde edilmiştir. 1,55 MPa olan katkısız agreganın serbest basınç dayanımı, bu karışım oranlarında hazırlanan numunede %135 artarak 2,10 MPa'a çıkmıştır. Serbest basınç dayanımında fosfojipsin azaltıcı yönde etkisi olduğu, borojipsin ise dayanımda çok etkili olmadığı da belirlenmiştir.

Keskin ve ark. (2009), çalışmalarında kaolin kiline ısı ile iyileştirme ve kireç ile iyileştirme yöntemlerini uygulamışlar ve serbest basınç mukavemetini araştırmışlardır. Kaolin kiline sırasıyla kireç katkılı iyileştirme, ısı ile iyileştirme ve kireç ile birlikte ısı ile iyileştirmesi yapmışlardır.

İlk olarak kaolin kiline %4 oranında kireç katarak anlık dayanımı ve 1 gün, 7 gün ve 28 günlük kür sonrasındaki dayanımları bulmuşlardır. Her bir kür için 3 adet serbest basma mukavemet deneyi yapmışlardır. Kür süresi arttıkça kireç kil karışımının serbest basma dayanımı artmıştır. Anlık serbest basma değeri ortalama 308 kPa'dan, 28 günlük kür süresinde ortalama 2807 kPa değerine kadar artmıştır. Isıl iyileştirilme yapılan 3'er adet numuneye 6 saat boyunca 105, 200, 400, 600, 800 ve 1050 °C olmak üzere 6 farklı sıcaklıklarda ısıtıl işlem uygulanmıştır. Serbest basma mukavemeti 105 °C' de ortalama 884 kPa, 1050 °C'de 3405 kPa ölçülmüştür. Sıcaklığın artması ile serbest basma mukavemetinin arttığı gözlemlenmiştir. Son olarak hem %4 kireç katkısı hem de ısıt iyileştirme uygulanan kaolin kilinin serbest basma dayanımı incelenmiştir. Kaolin kiline %4 kireç katılarak hazırlanan numuneler üzerinde biri hemen, diğerleri 1 gün, 7 gün ve 28 gün kür sonunda olmak üzere 6 saat süreyle 200-1050 °C arasında ısıtıl işlem uygulanmıştır. Deney sonunda en düşük serbest basma mukavemeti, %4 kireç katkılı kile 200 °C'de ısıtıl işlem uygulaması sonrasında 2262 kPa olarak ölçülmüştür. En yüksek serbest basma dayanımı, %4 kireç katkılı kilde 28 gün kür edildikten ve 1050 °C ısıtıl işlem uygulamasından sonra 13585 kPa olarak bulunmuştur. Sonuçta, uygulanan 3 yöntemde de serbest basınç mukavemetinde artışlar görülmüştür. En yüksek serbest basma mukavemetinin her iki iyileştirmenin beraber kullanıldığı durumlarda meydana geldiği belirtilmiştir.

Bilgen ve Kavak (2011), düşük plastisiteli Kocaeli kili üzerinde, kireç ve çelikhane cürufu katkı malzemelerini kullanarak zeminin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesini araştırmışlardır. Kocaeli Uzunçiftlik beldesinden elde edilen kile %4 kireç, %2,66 çelikhane cürufu ve %4 kireç, %6 çelikhane cürufu olmak üzere iki farklı oranda katkı yaparak hazırladıkları karışımları 1 - 7 - 28 günlük sürelerde küre bırakmışlar, sonrasında numuneler üzerinde serbest basma deneyleri ve sadece 28 günlük numunelerde CBR deneyleri yapmışlardır. Katkı malzemelerinin kil üzerindeki etkilerini gözlemlemek için doğal kil numunesi üzerinde de serbest basma ve CBR deneyi uygulamışlardır. Deneyler sonunda serbest basma dayanımı ve CBR değerlerinde en yüksek artış %4 kireç ve %2,66 çelikhane cürufu oranlarının kullanıldığı durumlarda bulunmuştur. CBR %6 değerinden %110 değerine yükselmiştir.

Serbest basma deneyinde 28 günlük kürün sonunda kırılma anındaki deformasyonlar %7 den %2' ye düşmüş, serbest basınç dayanımı 164 kPa'dan 1426 kPa'a yükselmiştir.

Şenol ve Günaydın (2011), çalışmalarında silis dumanı ve fosfojipsi iyi derecelenmiş granüler malzemeye ekleyerek zemin iyileştirilmesine etkilerini araştırmışlardır. Granüler malzeme olarak, konkasör tesisinde 0 - 25 mm çapında kırılmış bazalt taşı kullanmışlardır. Granüler malzemeye %5 - 10 - 15 oranlarında silis dumanı ve %5 - 10 - 15 - 20 oranlarında fosfojips eklenerek Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) ve serbest basınç dayanımı ve deformasyon değerlerini belirlemişlerdir. CBR, serbest basınç dayanımı ve deformasyon değerlerinde en iyi sonuç veren numuneler silis dumanının %15, fosfojipsin %20 oranında kullanıldığı karışımlardır. CBR değeri %246 artarak %455 değerine ulaşmıştır. Serbest basma dayımı $6,5 \text{ kg/cm}^2$ 'den $27,26 \text{ kg/cm}^2$ 'ye yükselmiştir. Eksenel deformasyon %13,8'den %2,93'e düşmüştür. Yapılan çalışmalar sonucunda silis dumanı ve fosfojipsin zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Aksoy ve Gör (2011), kumul zeminlere farklı katkı maddeleri katarak kuru birim hacim ağırlık (KBHA) değerinin, en büyük değere hangi katkı maddesi kullanıldığında ulaşacağını belirlemeye çalışmışlardır. Laboratuvar ortamında kumulların dane dağılımına benzer bir granülometride zemin elde etmişlerdir. Kumula ağırlıkça %3 - 5 - 10 oranında Porland çimentosu, silis dumanı ve uçucu kül ayrı ayrı eklenerek karışım hazırlanmıştır. Araştırmacılar, hazırladıkları karışımlara Proktor deneyi uygulayıp optimum su muhtevasını ve kuru birim hacim ağırlığı bulmuşlardır. Deney sonucunda %10 silis dumanı katılarak elde edilen karışımın kuru birim hacim ağırlığı $1,69 \text{ kg/cm}^3$ 'den $1,84 \text{ kg/cm}^3$ 'e yükselmiş, karışımın bu oranda en yüksek kuru birim hacim ağırlığa sahip olduğu görülmüştür.

Majedi ve ark. (2013), çalışmalarında lateks katkılı su sevmez kilin (hidrofob) geoteknik özelliklerini ve sönüm oranını incelemişlerdir. Hidrofob kile ağırlıkça %0 - 5 - 10 - 15 - 20 lateks ve %0 - 10 gliserin ekleyerek nanokil-kompozit numuneler elde etmişlerdir. Kompaksiyon ile optimum su muhtevasında sıkıştırılan numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapılmıştır.

Serbest basınç dayanımında lateks katkısının artmasıyla azalma görülmüştür. Dayanım, lateks katkısı %5 iken %56 oranında, %20 iken %66 oranında azalmıştır. Nanokil-kompozit numunenin lateks katkısı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlıkları, dane birim hacim ağırlığı ve serbest basıncının azaldığı, sönüm oranının ise arttığı görülmüştür.

Çimen ve ark. (2013), yaptıkları çalışmada yüksek plastisiteli kile volkanik tüf ekleyerek geoteknik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Yüksek plastisiteli Eşen kiline No:40 elek altı volkanik tüf belirli oranlarda ilave edilmiştir. Volkanik tüf, kile ağırlıkça %0, %2, %5, %10, %15, %20, %25, %30 ve %35 oranlarında eklenerek standart kompaksiyon, kıvam limiti, şişme basıncı ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deney sonucunda ideal katkı oranı %25 olarak belirlenmiştir. İdeal katkı oranında kuru birim hacim ağırlıkta artış ve optimum su muhtevasında düşüş görülmüştür. Volkanik tüf oranının artmasıyla kilin likit limiti ve plastisite indisi azalmıştır. Serbest basma dayanımı %180 artarak 3,96 kg/cm²'ye yükselmiştir.

Özocak ve ark. (2013), çalışmalarında siltli zemine uçucu kül malzemesi ilave edilmesi durumunda mekanik özelliklerin hangi yönde değişeceğini araştırmışlardır. Araştırmacılar, Adapazarı kent merkezinden alınan siltli zemine ağırlıkça %5, %7,5, %10, %12,5, %15, %20, %25, %30, %40 C sınıfı uçucu kül ekleyerek standart Proktor enerjisiyle sıkıştırarak optimum su muhtevasını ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı bulmuşlar, uçucu kül oranı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlığın %5 azaldığını görmüşlerdir. Optimum su muhtevasında hazırlanan numunelere konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyi (UU) uygulandığında %15 uçucu kül oranına kadar drenajsız kayma direncinde azalma, %15 oranından sonra artış olduğu görülmüştür. Uçucu kül oranının artmasıyla da Adapazarı siltinin geçirimsizlik katsayısının yükseldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca uçucu kül miktarının %25 oranının üzerinde olması durumunda siltli zeminin sıvılaşma potansiyeli olmadığı sonucuna varmışlardır.

Kurt Albayrak ve Altun (2018), çalışmalarında mermer tozu katkılı kil zeminlere biyopolimer ilave ederek etkileşmesi sonucu oluşan karışımların geoteknik özelliklerini araştırmışlardır. İlk olarak Erzurum Oltu bölgesine ait kile %5, %15, %25 oranında mermer tozunu kuru halde ekleyerek 3 farklı mermer tozu katkılı kil karışımı hazırlamışlardır. Mermer tozu katkılı kil numunelere, deneyde kullanılan suyun yüzdesi cinsinden %0,5, %1, %1,5 biyopolimer (keçiboynuzu gam) suyla birlikte ilave edilmiştir. Biyopolimerli kil mermer tozu karışımları üzerinde kıvam limitleri ve standart Proktor deneyleri yapmışlardır. Deneyler sonucunda mermer tozu yüzdesinin artmasıyla likit limit, plastik limit ve plastisite indisinin azaldığı bulunmuştur. Biyopolimer yüzdesinin artması ile likit limit değerlerinin yükseldiği %1 oranından sonra ise likit limitte düşme gözlemlenmiştir. Biyopolimerin artmasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde önce azalma, %1 oranından sonra ise artış meydana gelmiştir.

2.5. Fiberlerin Katkı Malzemesi Olarak Kullanıldığı Çalışmalar

2.5.1. Doğal fiberlerin kullanıldığı çalışmalar

Karakan ve ark. (2016), çalışmalarında kum zemine polipropilen fiber donatı yerleştirerek zeminin sıvılaşma direncini araştırmışlardır. Temiz kumu %30 ve %70 rölatif sıklıkta hazırlayarak kuru ağırlığın %0,25, %0,5 ve %1'i oranında fiber malzeme eklemişlerdir. Çalışmada, fiber boyu 6 mm ve 12 mm uzunluğunda seçilerek 100 kPa çevre basıncı altında tekrarlı dinamik üç eksenli deneyi yapılmıştır. Fiber boyunun ve oranının artmasının sıvılaşmaya karşı dayanımı arttırdığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca fiberin yanal yayılmaları engellediği tespit edilmiştir.

Özdemir ve ark. (2016), yaptıkları çalışmada kaolin kilini bazalt fiber ve kireç ile güçlendirerek zemin dayanımı özelliklerini araştırmışlardır. Ağırlıkça %0 ve %9 kireç katkılı kile 6 mm uzunluğunda bazalt fiberler %0, %0,5 ve %1 oranlarında eklenerek standart Proktor enerjisi ile sıkıştırılmıştır. Numuneler maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevasında hazırlanmışlardır. Araştırmacılar, bu numuneler üzerinde 1, 7 ve 28 günlük kür sonunda serbest basma deneyi yapmışlardır.

Kaolin kiline bazalt fiber ve kireç ilavesiyle serbest basma dayanımında artış meydana gelmiştir. Deneyler sonucunda katkısız kilin serbest basınç dayanımı 95 kPa bulunurken, en yüksek dayanım %9 kireç katkılı, %1 fiber içeriğinde 28 günlük numunede 545 kPa değerinde ölçülmüştür. Kireç katkısız %1 fiber içerikli numunenin 28 günlük dayanımı 186 kPa bulunmuştur. Bazalt fiberin artışı aynı zamanda sünekliliği de arttırmıştır. Bazalt fiber oranı %0,5'ten %1'e çıkarıldığında dayanımda iki kat artış meydana geldiği görülmüştür.

Ndepete ve Sert (2017), çalışmalarında silt zemine farklı boylarda ve oranlarda bazalt fiber ekleyerek bunun drenajsız kayma direncine etkisini araştırmışlardır. Silt zemine 6, 12, 24 mm uzunluğunda %1 - 1,5 - 2 oranlarında bazalt fiber ekleyerek 200 kPa düşey gerilme altında konsolide ederek numune hazırlamışlardır. Bulamaçtan konsolide edilerek hazırlanan numuneler üzerinde 100, 200, 300 ve 400 kPa çevre basınçlarında üç eksenli (UU) hücre kesme deneyleri yapmışlardır. Deneyler sonucunda maksimum artışı sağlayan fiber oranı %1,5 ve fiber boyu ise 24 mm olarak bulunmuştur. En az artış %1 fiber oranı ve 6 mm fiber uzunluğu olan karışımlarda ölçülmüştür. Sonuç olarak fiber uzunluğunun artması ile dayanımda sürekli artışlar görülürken, fiber oranının %2 olduğu durumda artış %1,5'a göre daha az olmuştur.

Kenan ve Özocak (2018), çalışmalarında doymuş siltli zemine bazalt fiber katkısının zeminin kayma direncine etkisini kesme kutusu deneyi ile incelemişlerdir. Adapazarı'ndan alınan siltli zemine 24 mm uzunluğundaki bazalt fiber %0 - 1 - 1,5 - 2 - 2,5 ve 3 oranlarında eklenerek oluşturulan numuneler 100 kPa düşey gerilmede konsolide edilmişlerdir. Sonrasında konsolide olan bu killer üzerinde kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde bazalt fiber katkısının artması ile kohezyon değerinde sürekli artışlar meydana geldiği görülmüştür. Kayma direnci açısı %2 fiber oranına kadar artış göstermiş olup, % 2'den sonra ise azalma göstermiştir. Tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde siltli zemin numunesinde optimum fiber oranı %1,5 olarak bulunmuştur.

2.5.2. Yapay fiberlerin kullanıldığı çalışmalar

Ayraçma ve Teymür (2014), çalışmalarında ince kuma cam fiber katarak mukavemet değerlerindeki değişimleri araştırmışlardır. Kuru kuma ağırlıkça %0,25 ve %0,50 oranında 2 cm uzunluğunda cam fiberler katılarak %20, %40 ve %60 rölatif sıklıkta numuneler hazırlanmış ve bunlar üzerinde kesme kutusu ve sabit seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda %60 sıklıktaki numuneler dışında içsel sürtünme açısı yükselerek kayma mukavemeti artmıştır. Fiber oranının artmasıyla mukavemet artarken yeni akım yollarının oluşması nedeniyle geçirimsizliğin de arttığı belirtilmiştir. Fiberin %0,5 oranında kullanıldığı %40 sıklıktaki numunenin kayma mukavemetinde %20 artış meydana gelmiştir. Gevşek sıklıktaki kumlara fiber katılmasıyla deformasyon eğrileri sıkı zemin deformasyon eğrilerine benzer bir eğri oluşturmuştur. Gevşek zemin numunelerinde sıkı zemine göre fiberin etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür.

Akbulut ve Arasan (2004), yaptıkları çalışmalarında kil zemine sentetik lifler katarak zeminin geoteknik özelliklerini araştırmışlardır. Araştırmacılar, sentetik lif olarak polietilen ve polipropilen lif kullanmışlardır. 5, 10, 15 ve 20 mm uzunluklarında lifler kilin kuru ağırlığınca %0,1, %0,2, %0,4 ve %0,6 oranında katılarak hazırlanan numuneler üzerinde serbest basma ve hakim frekans deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda en yüksek mukavemet değeri 5 mm uzunluğunda %0,1 polipropilen lif içeriğinde elde edilmiştir. Serbest basınç mukavemeti %122 artarak 209 kPa'a yükselmiştir. Polietilen lifli karışım sonuçlarına göre en yüksek değer 15 mm uzunluğunda %0,2 lif içeriğinde %62 artarak 152 kPa olarak elde edilmiştir. Lif içeriğinin %4'ten fazla olduğu örneklerin dinamik özelliklerinde düşüş görülmüştür.

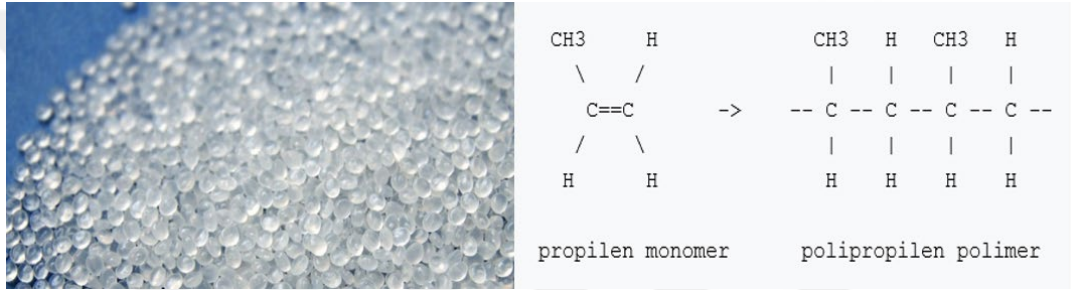
Bali (1990), o zaman için yeni geliştirilen sentetik iplerin zemin iyileştirilmesinde kullanımı anlatmıştır. Texsol, Paris'te Rouen'deki karayolları tarafından geliştirilmiştir. 1985 - 1987 yılları arasında 35 farklı projede yaklaşık 50.000 m³ Texsol kullanılmıştır. Texsol genellikle kumlu zeminlerde daha iyi sonuç vermiştir. Kumlu zemine %1 - %2 oranında karıştırılması ile yapılan deneylerde zeminin kohezyonunu ve sürtünme açısını arttırmıştır.

Texsol'u kum zeminle karıştırıp üç eksenli basınç deneyi yapıldığında deformasyon dayanımı yaklaşık %200 artmış ve yüksek esnek bir davranış göstermiştir. Texsol, Paris Ulaşım İşletmeleri tarafından trenlerin geçtiği yerde kullanılarak istinat duvarlarının güvenlik sayısını arttırmıştır.



BÖLÜM 3. POLİPROPİLEN VE POLİPROPİLEN FİBERLER

Polipropilen, monomer propilenin polimer hale getirilmesi ile elde edilen kimyasal solventlere (asit ve bazlar) karşı aşırı derecede dirençli termoplastik bir polimerdir (Şekil 3.1.) (URL-3).



Şekil 3.1. Polipropilen ve polipropilenin monomer modeli (URL-3).

Polimer, çok sayıda moleküllerden oluşan birbirine bağlı veya dallı yapıya sahip büyük bir moleküldür. Polimer birbirine bağlı birçok monomerden oluşur. Büyük moleküllerin temel yapı taşını oluşturan küçük molekül monomerdir. Polipropilenin monomer modeli propilendir. Polimerlerin özellikleri çeşitlerine göre değişir. Bazıları sert ve kırılkan olup, bazıları elastik olduğundan esnek bir yapıya sahiptir. Fiziksel özellikleri sıcaklık ve basınç altında değişim gösterir. Yüksek sıcaklığa dayanımı sayesinde hastanelerde sterilizasyon gerektiren malzemelerin imalatında kullanılmaktadır.

3.1. Polipropilenin Tarihçesi

Selüloz bileşikleri üzerine ilk araştırmayı 1811 yılında Henry Braccanot yapmıştır. Mukavemeti arttırmak için selüloz üzerine kauçuk vulkanize edilmiştir. Belçikalı kimyager Leo Baekeland, tamamen sentetik polimer olan bakaliti sentezlemiştir.

Propilen, ilk defa Giulio Natta ve Alman kimyager Karl Rehn tarafından 1954 yılı Mart ayında polimerleştirilerek kristalin izotaktik bir polimer haline getirilmiştir. Bu keşif sayesinde İtalyan şirketi Motecatini, 1957 yılından bu yana izotaktik propilenin ticari üretimini yapmaktadır (URL-3).

1954'te keşfedilmesinden ve 1957'de endüstriyel üretimin başlamasından bu yana, polipropilen, diğer ticari plastiklerle karşılaştırıldığında düşük yoğunluğu nedeniyle hızla popülerlik kazanmıştır. Ayrıca, polipropilen olağanüstü kimyasal dirence sahiptir ve ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama gibi geleneksel yöntemler kullanılarak işlenebilir (Habib, 2019).

3.1.1. Polipropilenin kullanım alanları

Polipropilen düşük maliyetli olduğundan çok geniş kullanım alanına sahiptir. Otomotiv sanayinde kullanılan parçalardan, tekstil, inşaat ve gıda paketlemesine kadar oldukça geniş kullanım alanı bulunan polimer türüdür. Monomer propilenin polimer hale getirilmesi ile elde edilen polipropilen kimyasal solventlere (asit ve bazlar) karşı aşırı derecede dirençlidir.

Polipropilen elyaflar beton, şap, bitüm gibi uygulamalarda kullanılan mikro donatı sistemleridir ve betonda ikincil donatı olarak kullanılırlar. Uygulama çeşidine ve alanına göre farklı boyutlarda imal edilebilirler. Hazır beton, püskürtme beton, sıvalar ve harçlar olmak üzere çimento esaslı kompozitlerde kullanılırlar. Taze beton aşamasında nemi tutan lifler, beton prizini aldıkça bu nemi betona geri vererek içten kürlleme etkisi yaparlar. Isı ve rötreye bağlı çatlakları azaltarak yüksek yapısal bütünlük sağlarlar. Beton yollarda kullanılarak tekrarlı yükler altında yorulma direncini artırarak boyuna çatlak oluşumunu önlerler. Kimyasal etkilere karşı direnç göstererek betonun ömrünü uzatırlar. Tünel kaplamalarında sağladığı süneklik, ani çökmeleri engeller. Yeraltı suyu etkisinde kalan donatılarda kesit kaybı oluşurken polipropilen korozyona uğramayarak donatının ömrünü uzatır. Isı iletkenliği olmadığı için yangın sırasında çelik donatılar gibi betonun ısınısını arttırmaz.

Liman yapılarında kullanılarak nem, rüzgâr ve tuzlu su etkisinin yüksek olduğu yapılarda korozyonu önler.

3.2. Polipropilen Fiber Katkısı ile Zemin İyileştirme Çalışmaları

Şenol ve Gümüşer (2009) tarafından yapılan çalışmada yüksek plastisiteli kile polipropilen elyaf ve uçucu kül katılmasının zeminin mukavemetine etkisi incelenmiştir. Araştırmacılar, uçucu külün plastisite indisine etkisini görmek için %10-%15 uçucu kül katkılı kilin kıvam limitlerini belirlemişlerdir. Deneysel çalışmada 19 mm uzunluğunda multifilament ve fibrilize olmak üzere iki tip polipropilen elyaf ağırlıkça %0,5 ve %1, uçucu kül ise %10 ve %15 oranlarında eklenerek homojen bir karışım oluşturulmuştur. Kül ve elyaf katkılı numunelere standart kompaksiyon deneyi yapılarak maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası belirlenmiştir. Hazırlanan numuneler üzerinde 1 - 7 - 14 günlük kürün ardından serbest basma deneyi yapılmıştır. Deneyde en yüksek dayanım gösteren karışım, 14 gün kürde bekletilen %20 uçucu kül katkılı ve %0,5 fibrilize polipropilen lif içeren numune olarak bulunmuştur. Katkısız kilin serbest basma dayanımı $1,8 \text{ kg/cm}^2$ iken en yüksek dayanım gösteren numunede bu değer 14 kg/cm^2 ölçülmüştür. Çalışma neticesinde elyaf içeren uçucu kül katkılı numunenin elyaf içermeyen uçucu kül katkılı numuneye göre uygulanan yüke karşı daha uzun süre dayanım ve yenilme direncinde ciddi artış gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca uçucu külün plastik limitini, likit limit değerinden daha fazla artırdığı için plastisite indisinin düştüğü de belirtilmiştir.

Zaimoğlu (2011), ince daneli zemine borojips, uçucu kül, katkısız çimento ve polipropilen fiber katkı malzemelerini çeşitli oranlarda ekleyerek bu malzemelerin serbest basma dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Toplam kuru ağırlığın %10 - 20 oranlarında borojips, %10 - 20 oranlarında uçucu kül, %1 - 3 oranlarında katkısız çimento ve %0,15 - 0,25 oranlarında polipropilen fiber ince daneli zemine (silt) eklenerek 28 gün boyunca kür uygulanmıştır. Serbest basma deneyleri sonucunda katkısız kontrol numunesinin dayanımı 0.57 MPa iken, en yüksek dayanım %10 borojips, %10 uçucu kül, %0,25 polipropilen fiber ve %0 katkısız çimento karışım oranlarında 1,56 MPa olarak bulunmuştur.

En düşük serbest basınç dayanımı ise %20 borojips, %10 uçucu kül, %0 polipropilen fiber ve %3 katkısız çimento karışım oranlarında 0.49 MPa olarak kontrol numunesinden daha düşük bir değerde elde edilmiştir.

Yılmaz ve Sevensan (2010), yaptıkları çalışmada Ankara kiline değişik oranlarda katılan uçucu kül ve polipropilenin serbest basınç dayanımını nasıl değiştirdiğini araştırmışlardır. İlk olarak kile kuru ağırlıkça %0, %10, %20 ve %30 oranlarında uçucu kül ekleyerek standart Proktor enerjisiyle sıkıştırmışlar ve uçucu kül - kil karışım numuneleri hazırlamışlardır. Hazırlanan numuneleri 1, 7, 14 ve 28 gün kür ortamında bekletmişlerdir. Daha sonra uçucu kül - kil karışımlarına kilin ağırlığınca %0,5 ve %1 oranında 19 mm uzunluğunda M ve F tipi iki farklı fiber eklemişlerdir. Fiber karışımlı numuneleri ise 28 gün kürde bekletmişlerdir. Hazırlanan numunelere serbest basma deneyi yapmışlardır. Deneyler sonucunda uçucu kül - kil karışımlarında 1 ve 7 gün kür sürelerinde %10'dan daha fazla uçucu kül katkısının serbest basma dayanımına etkisinin yok denecek kadar az olduğu, 14 ve 28 günlük kür sürelerinde ise uçucu kül oranının artmasıyla serbest basma dayanımının arttığı görülmüştür. Uçucu kül - kil karışımının serbest basma dayanımında katkısız kile oranla yaklaşık %236 oranında artış olmuştur. Uçucu külün olmadığı fiber katkılı numunelerde fiber saf kilin dayanımını düşürmüş, %1 fiber katkısı %0,5 fiber katkısına göre dayanımı arttırmıştır. En iyi artış, %10 uçucu kül ve %1 M tipi fiberin kullanıldığı numunede yaklaşık %53 olarak görülmüştür. Uçucu kül ile birlikte M tipi fiberin kullanıldığı numunelerde %1 fiber katkısının %0,5 fiber katkısına göre serbest basma dayanımında etkisinin daha çok olduğu görülmüştür. Çalışmada, fiberin serbest basma dayanımına etkisinin belirli eğilimde olduğu sonucuna da kesin olarak varılamamıştır.

Zaimoğlu (2010), polipropilen ve diğer bazı katkı malzemelerini kullanarak ince daneli zeminlerin serbest basınç dayanımının optimizasyonu üzerinde çalışmıştır. Borojips, uçucu kül, katkısız çimento ve polipropilen, ince daneli zemine (silt) belirli oranlarda eklenerek 7 gün kür sonunda serbest basma dayanımları bulunmuştur. Toplam ağırlığın %10 - %20'si oranında borojips, %10 - %20'si oranında uçucu kül, %1 - %3'ü oranında katkısız çimento ve %0,15 - %0,25'i oranında polipropilen ince daneli zemine eklenerek homojen bir karışım oluşturulmuştur.

Deney sonucunda katkısız ince daneli zeminin serbest basınç dayanımı 0,57 MPa olarak belirlenmiştir. En düşük dayanım %20 borojips, %10 uçucu kül, %0 polipropilen ve %3 katkısız çimento kullanılan karışımda 0.35 MPa olarak ölçülmüştür.

En yüksek serbest basınç dayanımı ise %10 borojips, %10 uçucu kül, %0,25 polipropilen fiber ve %0 katkısız çimento kullanılan karışımda katkısız numuneye göre %61 artarak 0,94 MPa olarak ölçülmüştür.

Soğancı (2014), çalışmasında polipropilen ilavesiyle, şişen zeminlerin şişme davranışının değişimini araştırmıştır. 12 mm uzunluğundaki polipropilen fiber, kil zemine %0, %0,5, %0,75 ve %1 oranlarında karıştırılarak kompaksiyon ve %1 oranında karıştırılarak tek eksenli, kompaksiyon ve bir boyutlu şişme deneyi yapılmıştır. Standart kompaksiyon deneyi ile optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı tayini tüm numuneler için yapılmıştır. Deneyler sonucunda elyaf katkısı arttıkça zeminin tek eksenli basınç dayanımının arttığı ve zeminin daha sünek bir davranış gösterdiği belirlenmiştir. Katkısız kilin dayanımı 202 MPa değerinden %1 polipropilen katkılı durumda 280 MPa değerine yükselmiştir. %1 polipropilen katkılı numunenin şişme yüzdesi %11,60 değerinden %5,3 değerine düşmüştür.

İnanır ve ark. (1998), çalışmalarında kum zeminlere ayrık yapılı lifler ilave ederek taşıma kapasitesindeki değişimi araştırmışlardır. İki tane cam esaslı (BMC1, DE1) ikisi de polipropilen esaslı (Duomix F20, Duomix M20) olmak üzere dört farklı lif kum zemine ağırlıkça %0,125, %0,25, %0,5, %1, %2, %3 ve %4 oranında eklenerek oluşturulan numuneler üzerinde CBR deneyleri yapılmıştır. Kum numuneleri %60 rölatif sıkılık ve yaklaşık %5-6 su muhtevasında hazırlanmıştır. Deney sonucunda F20 lifi hariç diğer lif katkılı numunelerde piston çapının %10'u civarında penetrasyon değerlerine kadar katkısız zemine göre daha düşük penetrasyon direnci gözlemlenmiştir. Donatılı zeminlerin pik gerilmesinin mobilize olduğu değerler BMC1-6, DE1-12, Duomix F20 ve Duomix M20 için sırasıyla %0,75, %0,5, %0,2 ve %0,3 olarak ortaya çıkmıştır. Pik değerlerinde en fazla artış BMC1-6 ve DE1-12 için %4 lif oranında sırasıyla %45 ve %135 olarak görülmüştür.

Doumix F20 ve Doumix M20 tipi liflerde %0,5 ve %0,375 lif oranlarında artış %350 ve %130 ölçülmüştür. Donatı miktarının artması ile liflerin penetrasyon direncine katkısı da artmıştır.

Çalik ve ark. (2019), yaptıkları çalışmada farklı uzunluktaki polipropilen lifi farklı oranlarda yüksek plastisiteli kile ekleyerek serbest basınç ve donma-çözülme deneyleri yapmışlardır. Araştırmacılar, 3 - 6 ve 12 mm uzunluğundaki polipropilen lifi, kuru ağırlığın %0,15, %0,20 ve %0,25'i oranında kile ekleyerek karışımları hazırlamışlardır. Optimum su muhtevasında ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkta hazırlanan numuneler üzerinde donma-çözülme çevrimlerinden sonra serbest basma deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak lif boyunun uzun olması yüksek çevrimlerde dayanımı arttırmıştır. %0,15 ve %0,20 oranlarında polipropilen liflerinin kullanıldığı numunelerin dayanımı genellikle azalmıştır. %0,25 polipropilen lif kullanılan numunenin ise donma çözülme dayanımı artmıştır.

BÖLÜM 4. MALZEMELER VE METOT

Bu bölümde, çalışmada kullanılan zemin ve katkı malzemesinin özellikleri, deney numunelerinin hazırlanması ve deneylerin yapılması hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca deney düzenekleri ve deney yöntemleri anlatılmıştır. Kil zemine farklı uzunluk ve oranlarda polipropilen katkı malzemesi eklenerek hazırlanan numunelerin drenajsız kayma direncindeki değişimler serbest basma deneyi ile incelenmiştir. Çalışmada, 10 mm - 20 mm - 30 mm - 40 mm ve 50 mm uzunluğundaki polipropilen doğal zemine %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranlarında katılmıştır. Deney sonuçları tablolar ve grafikler halinde sunulmuştur.

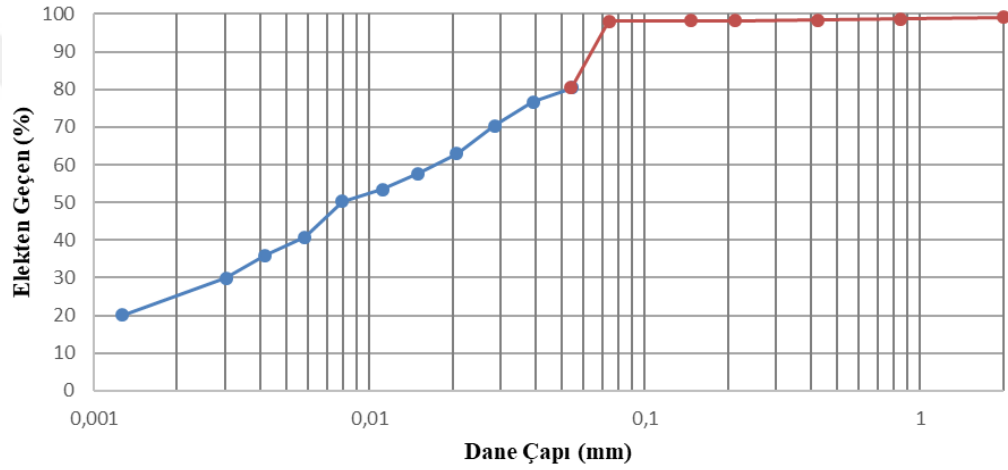
4.1. Malzemeler

4.1.1. Kil zemin

Çalışmada Kocaeli ilinden getirilen kil zemin kullanılmıştır. Serbest basma deneyinde kullanılacak zemin Şekil 4.1.'de gösterildiği gibi öncelikle 4 nolu elekten geçirilerek topraklarından ve olası yaprak vb. gibi yabancı maddelerden arındırılmıştır. %2 oranında kum ve %98 oranında ince malzeme içeren CI sınıfındaki zemine ait dane dağılım eğrisi Şekil 4.2.'de, fiziksel özellikler ise Tablo 4.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. 4 nolu elekten elenen kil zemin.



Şekil 4.2. Kil zeminin dane dağılım eğrisi.

Tablo 4.1. Kil zeminin fiziksel özellikleri.

Killi Zemin		
Özellik	Birim	Değer
İnce Dane Oranı (FC)	%	98
Kil Oranı (C)	%	25
Likit Limit (LL)	%	39
Plastik Limit (PL)	%	14
Plastisite İndisi (PI)	%	25
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık ($\gamma_{k,maks.}$)	kN/m ³	18,3
Optimum Su Muhtevası (w_{opt})	%	15
USCS ve TS sınıflandırma sistemlerine göre sınıf: CI		

4.1.2. Polipropilen fiber

Çalışmada, Kordsa Teknik Tekstil A.Ş. tarafından yüksek performanslı polipropilen ham maddesinden EN 14889-2 Sınıf 2 ve ASTM C 1116 standartlarına göre üretilen KraTos Makro polipropilen fiber kullanılmıştır. Literatürde bu malzemenin zemin iyileştirmesinde kullanımına dair bir belgeye rastlanmamıştır. Buradan hareketle bu tez çalışmasında bir ilk olarak KraTos Makro fiberin zemin iyileştirmesinde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

KraTos Makro, beton güçlendirme uygulamalarında işçilik, hız, enerji ve maliyet tasarrufu sağlanmasının yanında uzun süreli durabilite ve düşük karbon emisyonu avantajıyla inşaat sektöründe kullanılan yeni nesil fiber çeşididir. Beton uygulamalarında oluşan önemli problemlerden yüzeysel rötreyi ve yük altında meydana gelen yapısal çatlakların oluşumunu engellediği ve betonun içinde homojen dağılan fiberin betonun taşıma kapasitesini arttırdığı bildirilmektedir (URL-5).

Beton ile kolay karışma ve hızlı uygulanabilirliği ile şap betonlarına, liman betonları ve ray altı betonlarına püskürtme betonlarından tünel kaplamalarına kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Yüksek alkali direnci özelliği ile zamanla çürümez ve korozyona uğramaz. Proje gereksinimleri göre KraTos Makro'nun beton içinde kullanım dozajı 2-10 kg/m³ aralığında değişmektedir (URL-5).

Polipropilen fiberler 10 mm - 20 mm - 30 mm - 40 mm ve 50 mm uzunluklarında zemine karıştırılmak üzere hazırlanmıştır. Polipropilen fiberin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 4.2.'de gösterilirken, görünümü Şekil 4.3.'te, çeşitli alanlardaki uygulama avantajlarına ait bilgiler ise Tablo 4.3.'de verilmektedir (URL-5). Bu tip fiberin homojen dağılarak (Şekil 4.4.) betonun her noktasında yer aldığı ve bu sayede etkin çatlak köprüleme (Şekil 4.5.) performansı gösterdiği bildirilmektedir (URL-5).

Tablo 4.2. Polipropilen fiberin fiziksel ve mekanik özellikleri (URL-5).

Polipropilen Fiber		
Özellikler	Değer	Birim
Fiber sınıfı	EN14889-2 Sınıf II	
Özgül ağırlık	0,91	gr/cm ³
Uzunluk	54	mm
Genişlik	0,7	mm
Çekme gerilmesi	550	MPa
Erime sıcaklığı	160	°C
Fiber adedi	50000	1/kg



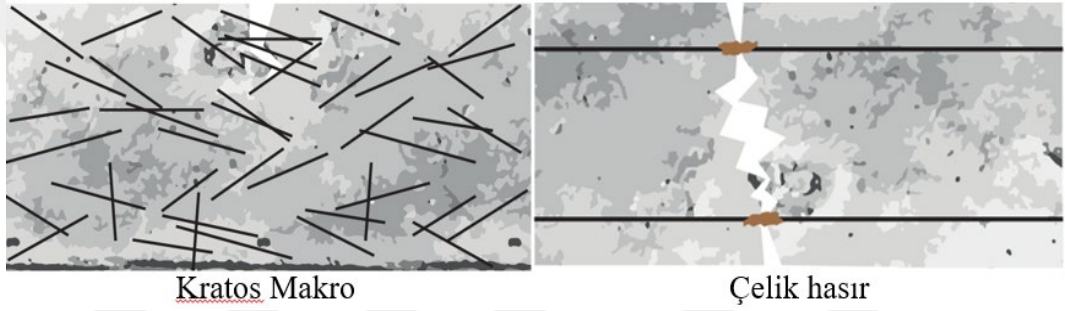
Şekil 4.3. Polipropilen fiberin görünümü (URL-5).

Tablo 4.3. KraTos Makronun özellikleri (URL-5).

Beton Güçlendirme Donatısı	Çelik hasır donatılar	Çelik fiber donatılar	KraTos Makro sentetik fiber donatılar
Plastik rötre çatlakları	-	-	+
Uzun dönemli kuruma rötresi çatlakları	+	+	+
Korozyon riski	-	-	+
Manyetik alanları etkileme riski	-	-	+
Makine ve ekipmanlara zarar verme riski	-	-	+
Hızlı işçilik	-	+	+
Kolay uygulanabilirlik	-	-	+
Çatlak sonrası yük taşıma kapasitesi	+	+	+
Lojistik avantajları	-	+	+

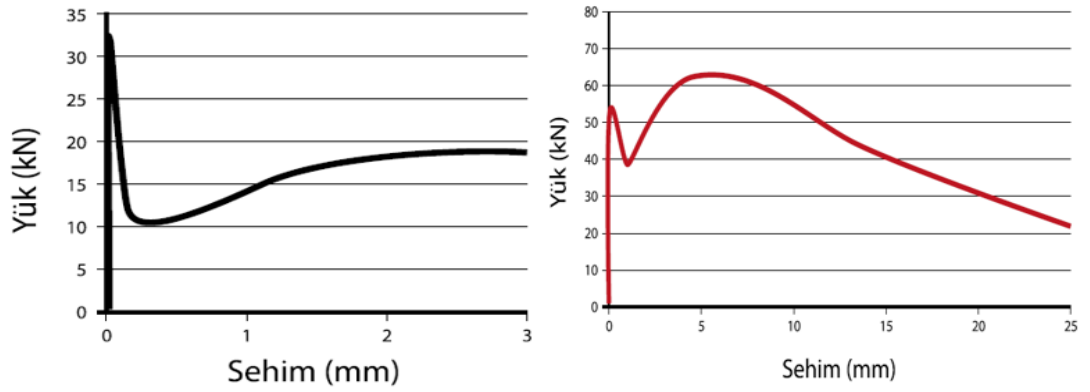


Şekil 4.4. KraTos Makronun beton içinde homojen dağılımı (URL-5).



Şekil 4.5. Polipropilen fiber (KraTos Makro) ve çelik hasırın beton içerisindeki görünümü (URL-5).

KraTos Makro; betonun yük taşıma kapasitesini ve tokluk değerini arttırmakta, etkili bir şekilde çatlak kontrolünü sağlamakta ve tekrarlı yükler altında betonun süneklik düzeyini yükseltmektedir. Kiriş ve plak testlerindeki rezidüel davranışı Şekil 4.6.'da verilmektedir (URL-5):



Şekil 4.6. Polipropilen fiberin 3 noktalı kiriş ve plaka testi (URL-5).

4.2. Deneysel Çalışmanın Amacı ve İçeriği

Deneysel çalışmanın amacı; yüksek dirençli KraTos Makro polipropilen fiber takviyesi ile kil zeminin drenajsız kayma direncindeki değişimleri incelemektir. Bu malzeme uzun zamandır betonun çeşitli özelliklerini iyileştirmek için kullanılıyor olsa da bu çalışma ile geoteknikte zemin iyileştirmesi alanında kullanımı bir ilk olarak gerçekleştirilmektedir.

Çalışmada kullanılan zemin sınıfını belirlemek için TS 1900 - 1 standardı uyarınca laboratuvarında doğal numuneler üzerinde likit limit, plastik limit ve elek analizi deneyleri yapılmış, özgül ağırlığın belirlenmesi için piknometre, zeminin kil yüzdesini belirlemek için de pipet analizi ve hidrometre deneyleri yapılmıştır. Doğal zemin ve polipropilen katkılı numunelere kompaksiyon deneyleri uygulanarak maksimum birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği değerleri belirlenmiştir.

Doğal kil zeminin drenajsız kayma direncini belirlemek için karışım, standart Proktor deneyi ile bulunan optimum su muhtevasında ($w=15\%$) hazırlanmıştır. Bu karışım ve hazırlanan diğer tüm karışımlar, içerdikleri suyun homojen dağılımını sağlamak ve sularını kaybetmelerini önlemek amacıyla naylon poşette muhafaza edilerek bir gün buzdolabında bekletilmiştir. Kür süresini tamamlayan her bir karışımdan silindirik tüpe yaklaşık 155 gr konularak standart Proktor tokmağıyla sıkıştırılmıştır. Silindirik tüpün üst ve alt kapaklarına 6'şar vuruş yapılarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen numuneler üzerinde serbest basma deneyi yapılmıştır.

Deneysel çalışma süresince 10 mm - 20 mm - 30 mm - 40 mm ve 50 mm uzunluğundaki polipropilen fiberler doğal zemine ağırlıkça %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranında karıştırılarak hazırlanan numuneler üzerinde serbest basma deneyleri tekrarlanmıştır.

Çalışma iki farklı boyutta numune üzerinde yürütülmüştür. Fiber boyu 50 mm'ye vardığından 35 mm çapına sahip numuneler yanında 50 mm çapa sahip numuneler de hazırlanmıştır.

Zemin, apı 50 mm, yüksekliği 100 mm olan numuneler hazırlanırken farklı boydaki tüm fiberlerle, çapı 35 mm ve yüksekliği 70 mm olan numuneler hazırlanırken ise 10 mm ve 20 mm uzunluğundaki fiberler ile karıştırılmıştır. Sonuçların güvenilirliğini artırmak için doğal ve polipropilen katkılı karışımların her birinden 10’ar adet numune hazırlanarak serbest basma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numunelerin çapları, polipropilen fiber boyları ve oranları Tablo 4.4.’de verilmiştir. Tez alışması kapsamında toplamda 300 adet serbest basma deneyi yapılmıştır. Deneylerin 10 tanesi 35 mm çaplı doğal zemin numuneleri, 10 tanesi 50 mm çaplı doğal zemin numuneleri, 80 tanesi 35 mm çaplı fiber katkılı zemin numuneleri ve 200 tanesi de 50 mm çaplı fiber katkılı zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir.



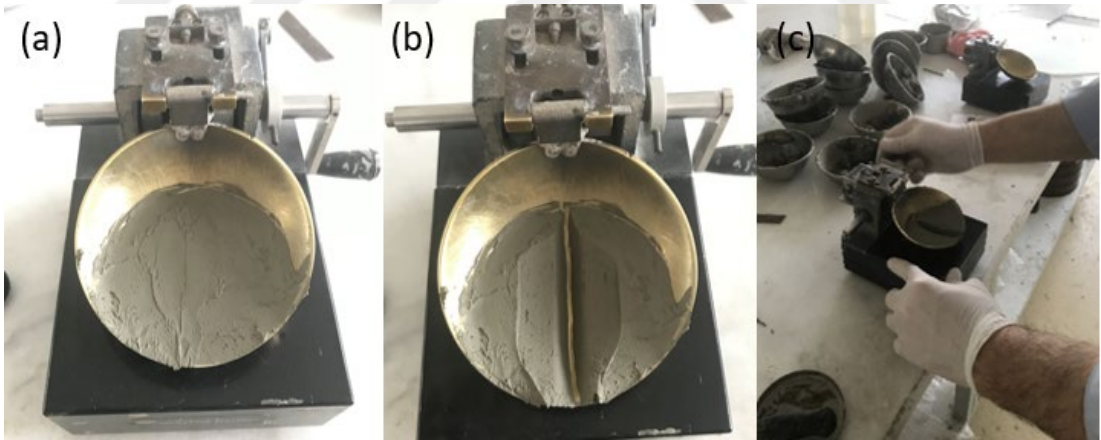
Tablo 4.4. Numunelerin çapı, fiber ağırlığı, fiber boyu ve oranları.

Karışım No	Numune Tanımı	Numune Çapı (mm)	Kil Ağırlığı (gr)	Fiber Ağırlığı (gr)	Fiber Boyu (mm)	Fiber Oranı (%)
1	Doğal zemin (kil)	35	1500	0	0	0
2	%0,5 Fiber katkılı kil	35	1500	7,5	10	0,5
3	%1 Fiber katkılı kil	35	1500	15	10	1
4	%1,5 Fiber katkılı kil	35	1500	22,5	10	1,5
5	%2 Fiber katkılı kil	35	1500	30	10	2
6	%0,5 Fiber katkılı kil	35	1500	7,5	20	0,5
7	%1 Fiber katkılı kil	35	1500	15	20	1
8	%1,5 Fiber katkılı kil	35	1500	22,5	20	1,5
9	%2 Fiber katkılı kil	35	1500	30	20	2
10	Doğal zemin (kil)	50	4500	0	0	0
11	%0,5 Fiber katkılı kil	50	4500	22,5	10	0,5
12	%1 Fiber katkılı kil	50	4500	45	10	1
13	%1,5 Fiber katkılı kil	50	4500	67,5	10	1,5
14	%2 Fiber katkılı kil	50	4500	90	10	2
15	%0,5 Fiber katkılı kil	50	4500	22,5	20	0,5
16	%1 Fiber katkılı kil	50	4500	45	20	1
17	%1,5 Fiber katkılı kil	50	4500	67,5	20	1,5
18	%2 Fiber katkılı kil	50	4500	90	20	2
19	%0,5 Fiber katkılı kil	50	4500	22,5	30	0,5
20	%1 Fiber katkılı kil	50	4500	45	30	1
21	%1,5 Fiber katkılı kil	50	4500	67,5	30	1,5
22	%2 Fiber katkılı kil	50	4500	90	30	2
23	%0,5 Fiber katkılı kil	50	4500	22,5	40	0,5
24	%1 Fiber katkılı kil	50	4500	45	40	1
25	%1,5 Fiber katkılı kil	50	4500	67,5	40	1,5
26	%2 Fiber katkılı kil	50	4500	90	40	2
27	%0,5 Fiber katkılı kil	50	4500	22,5	50	0,5
28	%1 Fiber katkılı kil	50	4500	45	50	1
29	%1,5 Fiber katkılı kil	50	4500	67,5	50	1,5
30	%2 Fiber katkılı kil	50	4500	90	50	2

4.2.1. Atterberg limitleri

4.2.1.1. Likit limit

Likit limit, zeminin plastik durumdan akıcı duruma geçtiği andaki su muhtevasıdır. Zemine fazla su verilirse zemin likit (sıvı) hale gelir, bu durumda zemin akıcıdır ve kayma direnci yoktur. Kurumaya bırakılırsa belli bir kayma direnci kazanır. Zeminin bu geçiş halindeki su muhtevasına likit limit denir. Likit limit deneyi No. 40 elek altına geçen zemine su eklenerek Casagrande cihazında veya koni düşürme cihazında yapılır. Casagrande cihazında iki tanesi 25 vuruşun altında, iki tanesi 25 vuruşun üzerinde olmak şartıyla 4 deney yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında kilin likit limit değerinin belirlenmesi için Casagrande ve düşen koni yöntemleri kullanılmıştır. Her iki yöntemde su zemin içinde homojen hale gelinceye kadar karıştırılmaktadır. Homojen hale gelen kil Casagrande cihazının kabına 1 cm kalınlığında yüzeyi yatay olacak şekilde spatula yardımıyla yerleştirilmektedir (Şekil 4.7.).



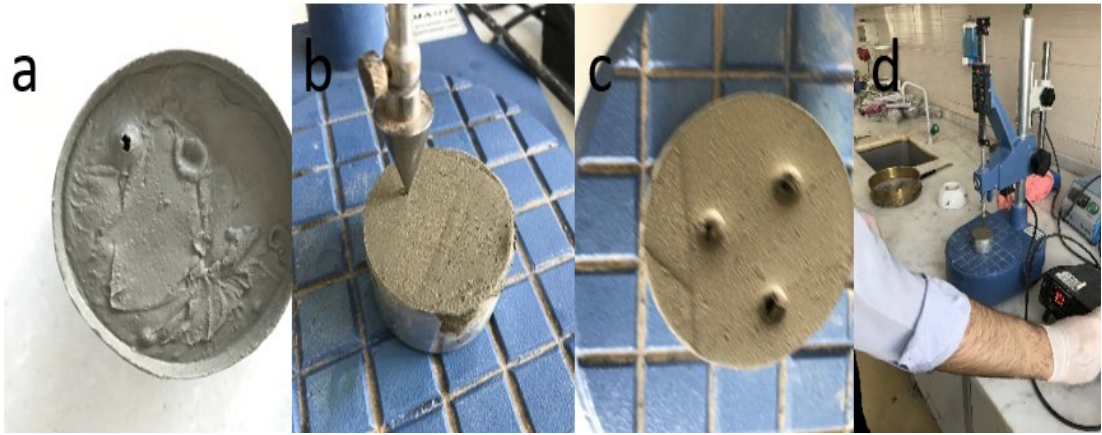
Şekil 4.7. Casagrande yöntemi ile likit limit bulunması (a) Casagrande cihazına zeminin yatay konulması (b) oluğun (yarığının) görünümü (c) Casagrande cihazı kabının saniyede 2 tur ile döndürülmesi.

Oluk açma bıçağıyla yukarıdan aşağıya 2 mm genişliğinde bir oyuk açılır. Casagrande cihazının kolu saniyede 2 tur hızla 1 cm yüksekliğinden düşürülür. Açılan oluğun uzunluğu yaklaşık 13 mm kapandığı anda deney bitirilir ve vuruş sayısı not alınır. Aynı işlemler dört farklı su muhtevası için tekrar edilir. Kapanan kısımdan alınan numune etüvde kurutularak su muhtevası hesaplanır.

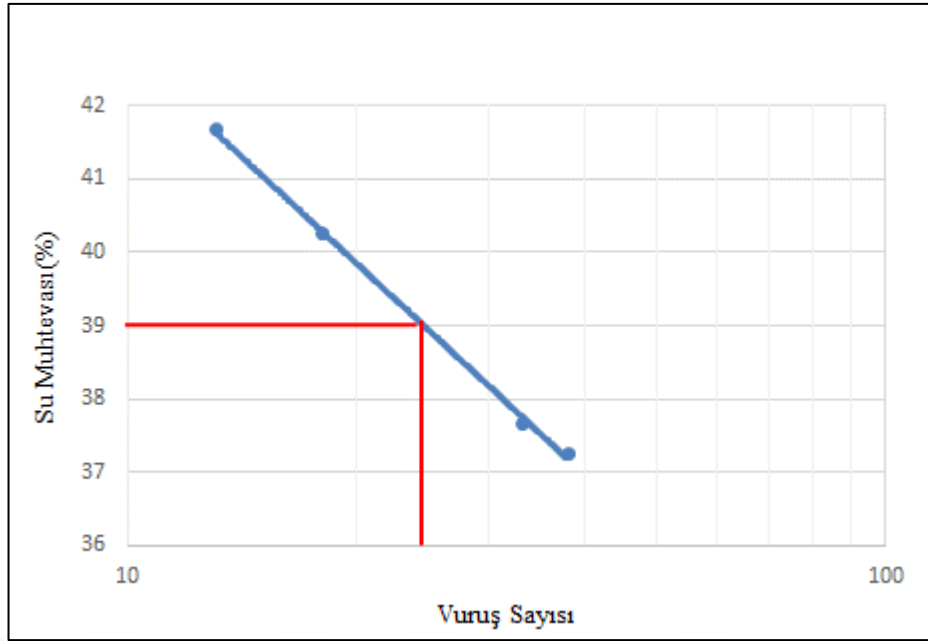
Düşey ekseninde 25 vuruşa karşılık gelen su muhtevası likit limit değeri olarak belirlenmektedir. Su muhtevası Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanır. Suyun kütleini M_w , dane kütleini M_s ifade etmektedir.

$$w = \frac{M_w}{M_s} * 100 \quad (4.1)$$

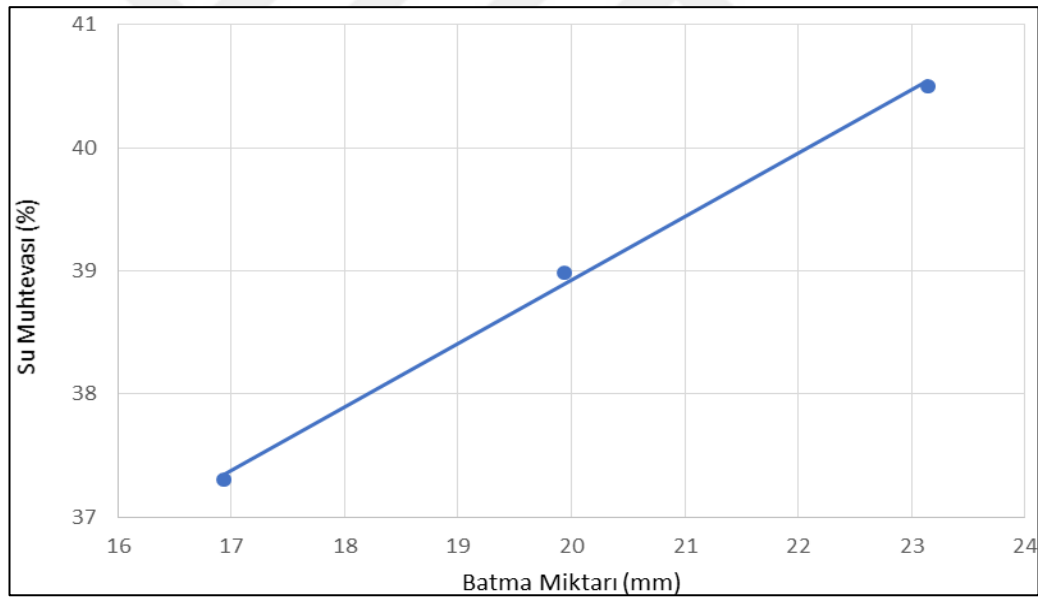
Düşen koni yönteminde, koniye benzer bir metal iğne kendi ağırlığı ile homojen zemin karışımına batırılır (Şekil 4.8.). Homojen hazırlanan numune metal deney kabına içerisinde hava olmayacak şekilde sıkıca yerleştirilir ve yüzeyi spatula ile düzeltilir. Koninin ucu yüzeyi belirsizce çizecek seviyeye kadar indirilir. Koni 5 sn boyunca kendi ağırlığı ile zemine batırılır, süre sonunda batma miktarı ölçülür. Aynı işlem metal kaptan zemin numunesi çıkarılmadan farklı noktalara toplamda 3 kere uygulanır ve ortalama batma miktarı bulunur. Batma miktarı 15 mm ile 25 mm arasında olmak üzere 3 farklı su muhtevasında yapılmaktadır. Su muhtevası ölçümü için bir miktar numune etüvde kurutulur. Casagrande deneyi sonuçları Şekil 4.9.'da, düşen koni deneyi sonuçları ise Şekil 4.10.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Koni deneyi (a) zeminin metal kaba sıkıca yerleştirilmesi, (b) koni ucunun zeminin yüzünü belirsizce çizecek seviyeye indirilmesi, (c) 3 farklı noktada koninin batırılması, (d) koninin serbest düşürülmesi.



Şekil 4.9. Casagrande deneyi likit limit sonucu.



Şekil 4.10. Düşen koni deneyi likit limit sonucu.

4.2.1.2. Plastik limit

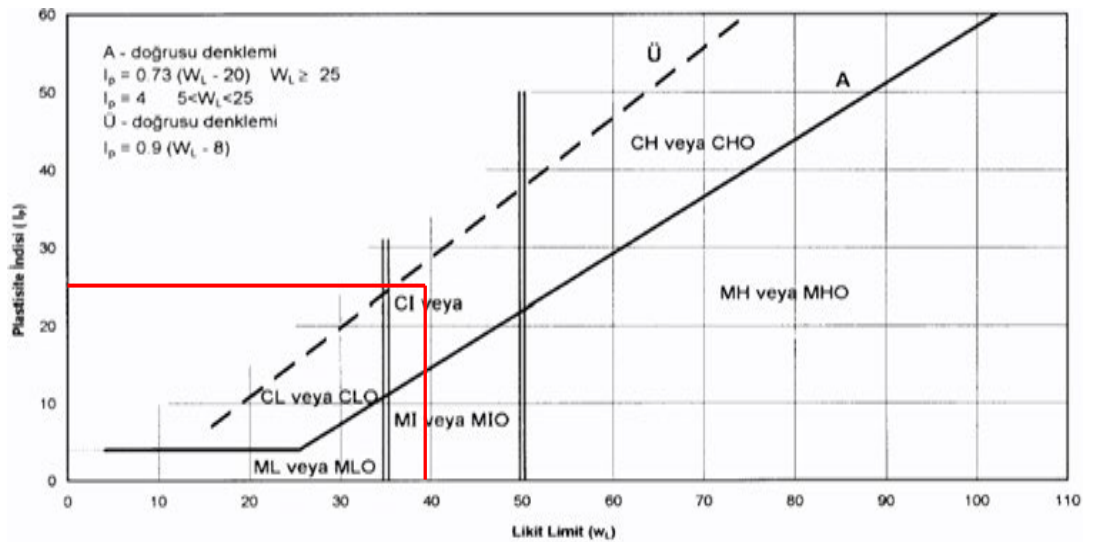
Plastik limit, zeminin şekil verilebildiği plastik kıvamdan yarı katı hale geçtiği andaki en düşük su muhtevası olarak tanımlanmaktadır. Deney öncesinde 40 nolu elekten geçen numune damıtık su ile homojen hale gelene kadar karıştırılıp cam plaka üzerine serilmektedir.

Daha sonra küre haline getirilen numune parçaları el ayası ile üzerine serildiği buzlu cam arasında yuvarlanmaktadır. Numune 3 mm kalınlığına geldiğinde çubukta çatlama oluşuyorsa deney sonlandırılmaktadır. Bu işlem en az iki kere yapılmaktadır. Su muhtevasını öğrenmek için çatlakan çubukların yaş hali tartılarak etüvde kurutulmaya bırakılmaktadır. Bulunan su muhtevalarının ortalaması plastik limit olarak alınmaktadır.

Plastisite indisi zeminin plastik limiti ile likit limiti arasındaki fark olarak elde edilmektedir. Tablo 4.1.' den de anlaşılacağı gibi çalışmada kullanılan kilin likit limiti (w_L) 39, plastik limiti (w_P) 14 ve plastisite indisi (I_P) 25 bulunmuştur. Plastisite indisi Denklem 4.2 yardımıyla hesaplanır.

$$IP = w_L - w_P \quad (4.2)$$

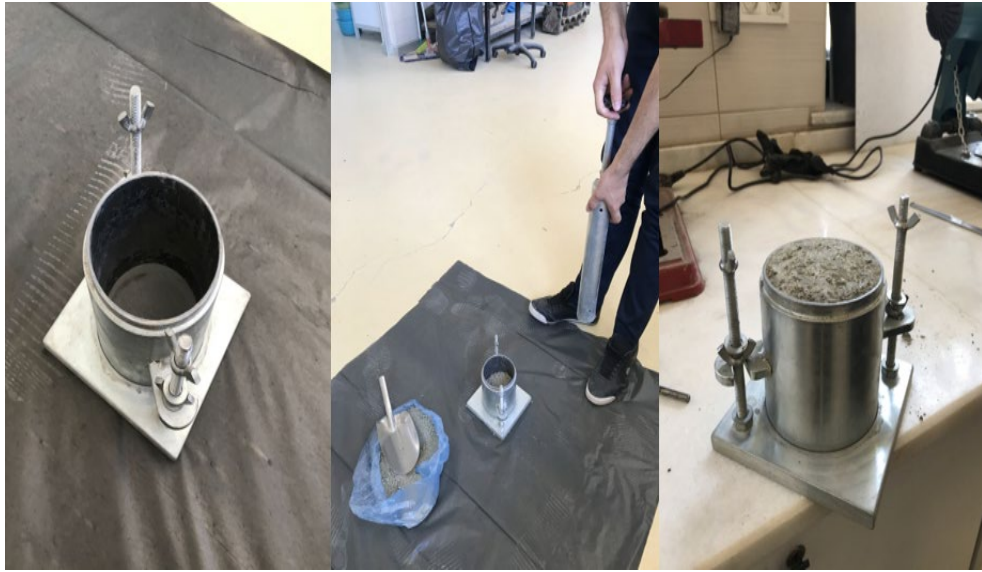
TS 1500/2000'e göre, ince daneli zeminleri sınıflandırmada plastisite kartı kullanılmaktadır. Likit limiti 35 ve 50 arasında olan killi zemin orta plastisiteli olarak değerlendirilir. Plastisite kartı yardımıyla TS1500/2000'e göre kil zeminin sınıfı CI (orta plastisiteli kil) olarak bulunmuştur (Şekil 4.11.).



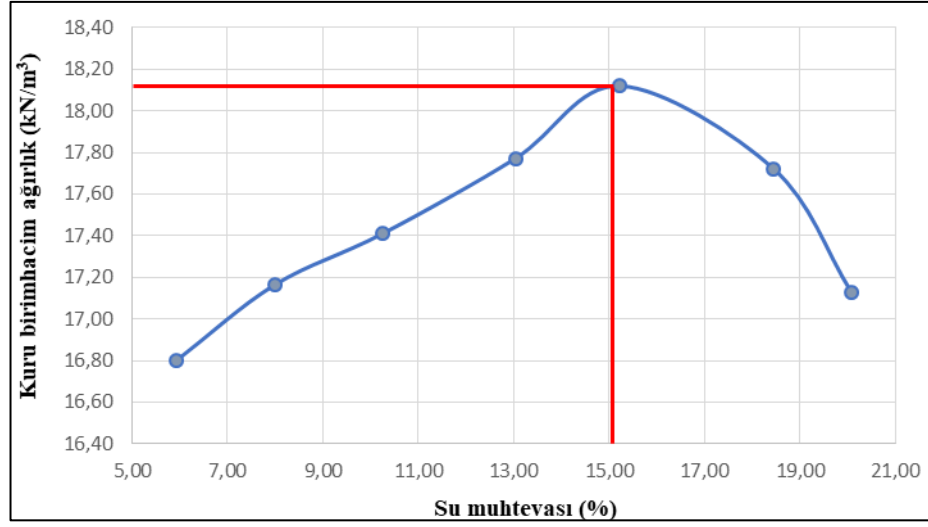
Şekil 4.11. Kil zeminin plastisite kartında gösterimi.

4.2.2. Kompaksiyon deneyi ve hesaplamaları

Kompaksiyon, zeminin tabakalar halinde serilerek farklı yöntemlerle sıkıştırılması ve böylece boşluk oranının azalmasının sağlanması işlemidir. Kompaksiyon, zeminin kayma mukavemetini arttırmak ve sıkışabilirliği azaltmak amacıyla yapılmaktadır. Standart Proktor sıkıştırma deneyi, zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığını ve optimum su muhtevasını belirlemek için yapılmaktadır. Standart kompaksiyon deneyi için 2000'er gr numuneye 50 ml, 100 ml, 150 ml, 200 ml, 250 ml ve 300 ml miktarında su ekleyerek homojen hale gelinceye karıştırılmıştır. Suyun zemin daneleri içinde homojen olarak dağılımının sağlanması için hava geçirmez poşete konularak soğuk ortamda 24 saat bekletilmiştir. Süresi tamamlanan karışımlar 3 tabaka halinde sıkıştırılmış, her tabakaya 25 vuruş yapılmıştır. Her bir tabakanın sıkıştırılması sırasında öncelikli olarak karşılıklı 4 tane kılavuz vuruş yapılmış, sonrasında diğer 21 vuruş saat yönünde dönülerek yapılmıştır (Şekil 4.12.). Sıkıştırılan zemin kalıp ile beraber tartılmış, kompaksiyon kalıbından su muhtevası ölçümü için bir miktar alınarak etüve konmuştur. Etüvde kurutulan numuneler tartılarak su muhtevası hesaplanmıştır. Sıkıştırılan zeminlerin birim hacim ağırlığı Denklem 4.3 kullanılarak bulunur. Şekil 4.13.'de kompaksiyon deneyi grafiği (kuru birim hacim ağırlık su muhtevası grafiği) görülmektedir.



Şekil 4.12. Kompaksiyon deneyi.



Şekil 4.13. Kuru birim hacim ağırlık su muhtevası grafiği.

$$\gamma_n \left(\frac{kN}{m^3} \right) = \frac{M(kalıp+zemin) - M(kalıp)}{V(kalıp)} * 9,81 \quad (4.3)$$

Su muhtevası Denklem 4.4 kullanılarak bulunur:

$$w = \frac{M(kap+yaş) - M(kap+kuru)}{M(kap+kuru) - M(kap)} \quad (4.4)$$

Kuru birim hacim ağırlık Denklem 4.5 kullanılarak bulunur:

$$\gamma_k = \frac{\gamma_n}{1+w} \quad (4.5)$$

Denklemler yardımıyla optimum su muhtevası %15, maksimum kuru birim hacim ağırlık 18,30 kN/m³ bulunmuştur.

4.2.3. Serbest basma deneyi ve hesaplamaları

Serbest basma deneyi, zeminin drenajsız kayma direncini bulmak için yapılır. Genellikle ince daneli, silindirik zemin numunesine eksenel yük uygulayarak kırılma anındaki maksimum kuvvetin bulunması esasına dayanmaktadır.

Ayrıca yük altında numunenin uzunluğundaki değişimle gerilme- deformasyon eğrisi bulunur. Serbest basma deneyinde, silindirik numunenin boy/çap oranı ikiye eşit veya ikiden büyük olması gerekmektedir.

Serbest basma deneyleri iki farklı silindirik numuneler üzerinde yapılmıştır. Birinci silindirik numunenin çapı 3,50 cm ve yüksekliği yaklaşık 7,00 cm'dir. İkinci numunenin ise çapı 5,00 cm ve yüksekliği yaklaşık 10 cm'dir. Hazırlanan numunelerin uzunlukları ve çapları kumpasla ölçülmüş, ağırlıkları hassas terazide tartılmıştır. Numune, üst ve alt kısmı serbest basma cihazının yükleme ekseninin tam merkezine gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Kuvvet uygulama çubuğu ile üst plaka arasındaki boşluk alınmıştır. Serbest basma deneyinde sadece maksimum kayma direnci ölçümü yapılmakta olup numuneye sadece eksenel kuvvet uygulanmıştır. Deney, numune kırılana kadar sürdürülmüştür. Deney bitirildikten sonra numunenin kırılma şekli çizilmiş, gerilme-şekil değiştirme grafiği oluşturulmuştur. Deney sırasında uygulanan gerilme, uygulanan kuvvetin numunenin deformasyona göre değişen alanına bölünmesiyle elde edilmektedir.

Numune kesit alanı Denklem 4.6 kullanılarak hesaplanır. Düşey yönde uygulanan kuvvet etkisiyle şekil değiştirme Denklem 4.7 kullanılarak hesaplanır.

$$A_0 = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (4.6)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H} \quad (4.7)$$

Deformasyon ile değişen numunenin kesit alanı Denklem 4.8 ve gerilme Denklem 4.9 kullanılarak hesaplanır.

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

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

4.3. Serbest Basma Deneyi için Uygun Numune Hazırlama Aşamaları

Araziden getirilen doğal haldeki numune 4 nolu elekten geçirilerek polipropilen fiberle karıştırılmak üzere hazır hale getirilmiştir. Uzunluğu 40 mm ve 54 mm olan polipropilen fiber maket bıçağı ile 10 mm - 20 mm - 30 mm - 40 mm ve 50 mm uzunluğunda (Şekil 4.14.) kesilmiştir.



Şekil 4.14. Polipropilen fiberlerin istenilen uzunluklarda kesilmesi.

Kuru ağırlığın %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranında fiber eklenerek optimum su muhtevasında homojen oluncaya dek karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımlar kür için bir gün poşete konularak soğuk ortamda bekletilmiştir. İlk denemelerde, standart Proktor enerjisi ile metal kalıpta zemin - fiber karışımı sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan zemin fiber karışımlarına 3,50 cm çapında 7,00 cm yüksekliğinde ince cidarlı çelik tüpler hidrolik yük uygulanarak ittirilmiştir. Polipropilen fiberin kalın ve sert olmasından kaynaklı olarak çelik tüplerin zemin fiber karışımı içine ittirilmesi sırasında örselenmeler ve kopmalar meydana gelmiştir (Şekil 4.15.). İnce cidarlı çelik tüpün uç kısmında toplanan fiberler numunede çatlaklara (Şekil 4.16.) yol açmıştır. Bu numunelerde serbest basınç dayanımı, fiber katılmadan hazırlanan numunelere göre daha düşük çıkmıştır. Sonuçta, bu şekilde numune hazırlama yönteminin uygun olmadığına karar verilmiştir.



Şekil 4.15. Kompaksiyon kalıbından tüpe alınan numuneler.



Şekil 4.16. Çelik tüpe numune alımı sırasında örselenen silindirik numuneler.

4.3.1. Sıkıştırma kalıbı karışım hesaplamaları

Silindirik numunelerde örselenmeyi önlemek amacıyla zemin fiber karışımlarının standart Proktor deneyindeki enerjiye karşılık gelen bir enerji ile doğrudan numune tüpü içerisine sıkıştırılmasına karar verilmiştir. Buna yönelik olarak Şekil 4.17. ve Şekil 4.18.'de görüleceği üzere sıkıştırma işlemi sonunda 3,50 cm çapında ve 7 cm yüksekliğinde (benzer şekilde 5,00 cm çapında ve 10 cm yüksekliğinde) silindirik numune elde edilmesini sağlayacak numune hazırlama kalıpları yaptırılmıştır. 3,50 cm çapında ve 7 cm yüksekliğinde silindirik numune elde etmek için sıkıştırma kalıbında sıkıştırılacak zemin ağırlığı, aşağıdaki hesaplamalar yapılarak bulunmuştur:



Şekil 4.17. 3,50 cm çap, 7,00 cm yüksekliğe sahip sıkıştırma kalıbı.



Şekil 4.18. İki kalıbın birlikte görünüşü.

Silindirik numunenin hacmi Denklem 4.10 yardımıyla bulunmuştur.

$$V = \frac{\pi * D^2}{4} * H \quad (4.10)$$

Burada çap 3,50 cm yükseklik 7,00 cm'dir. Silindirik numunenin hacmi 67,350 cm³ olarak bulunmuştur.

Silindirik numunenin ağırlığı ise Denklem 4.11 yardımıyla bulunmuştur.

$$M = \frac{V \cdot r_n}{9,81} \quad (4.11)$$

Burada $\gamma_n=20,86 \text{ kN/m}^3$ alınarak sıkıştırılacak toplam ağırlık 153,22 gr bulunmuştur. Sonrasında zemin-fiber karışımından 155 gr alınarak sıkıştırma kalıbında standart Proktor enerjisi baz alınarak (iki kat) sabit bir enerji ile sıkıştırılmıştır.

5,00 cm çapında ve 10,00 cm yüksekliğinde silindirik numune elde etmek için sıkıştırma kalıbında sıkıştırılacak zemin ağırlığı, benzer hesaplamalar yapılarak bulunmuştur. Buna göre silindirik numunenin hacmi $196,35 \text{ cm}^3$, sıkıştırılacak karışım ağırlığı 445,782 gr bulunmuştur. Zemin-fiber karışımından 450 gr alınarak sıkıştırma kalıbında standart Proktor enerjisi baz alınarak (iki kat) sabit bir enerji ile sıkıştırılmıştır (Şekil 4.19.).



Şekil 4.19. Sıkıştırma kalıbında numunelerin hazırlanması.

4.3.2. Sıkıştırma kabına uygulanacak enerjinin hesaplanması

Tez çalışmasında 300 tane numune üzerinde serbest basma deneyi yapılmıştır.

KraTos Makro polipropilen fiberin kil zeminin drenajsız kayma direnci üzerindeki etkisinin araştırıldığı bu çalışmada sadece fiber oranı ve uzunluğu değiştirilmiştir. Doğal zeminin optimum su muhtevası kullanılarak hazırlanan zemin ve fiber karışımları standart Proktor deneyi enerjisi baz alınarak sabit bir enerji ile sıkıştırılmışlardır. Tablo 4.1.'de kil zemine ait tüm özellikler verilmiştir. Numuneleri sıkıştırmak için kullanılacak enerji standart Proktor enerjisinin iki katı olarak tayin edilmiştir. Standart Proktor deneyinde 2,495 kg ağırlığındaki tokmak 30,48 cm'den düşürülerek 944 cm³ hacmindeki bir zemini sıkıştırmak için 3 kademedede toplam 75 vuruş (3 x 25) yapılarak 592,7 kJ/m³ enerji uygulanmaktadır (Denklem 4.12).

$$E = \frac{\text{Tokmağın ağırlığı (kg)} * \text{tokmağın düşme yüksekliği (m)} * \text{tabaka sayısı} * \text{vuruş sayısı}}{\text{kalıp hacmi (m}^3\text{)}} \quad (4.12)$$

Bu çalışmada kullanılan sıkıştırma kalıbının hacmi daha küçük olduğu için vuruş sayısı yeniden hesaplanmıştır. Ayrıca sıkıştırma kalıbına 3 kademe vuruş yapıldığında kademeler arasında derz oluşmuş ve yekpare silindirik numune elde edilememiştir. 3 kademe halinde yapılan sıkıştırma işleminde yüzey alanı küçük olduğu için gerekli ondülasyon yüzeyi oluşmamıştır. Bu sebeple silindirik numuneler tek kademe halinde sıkıştırılmıştır. Numunenin yüksek olması ve tokmağın tek taraftan düşürülmesi neticesinde enerjinin uygulandığı tarafın daha çok sıkıştığı görülmüştür. Bunu önlemek için sıkıştırma kalıbının alt ve üst kısımlarına aynı sayıda vuruş yapılarak her iki tarafın da eşit miktarda sıkıştırılması sağlanmıştır.

Çapı 3,50 cm, yüksekliği 7,00 cm olan silindirik numune için vuruş sayısı aşağıdaki şekilde belirlenmiştir:

Burada standart Proktor enerjisi 592,7 kJ/m³, kalıp hacmi 67,350 cm³, tokmak ağırlığı 2,495 kg, tokmağın düşme yüksekliği 30,48 cm tabaka sayısı 1 olarak kabul edilmiştir. Formülde verilenler yerine yazıldığında vuruş sayısı 5,4 bulunmuş, bir üst rakama yuvarlanarak 6 vuruş yapılmıştır. Böylece kalıbın alt tarafına 6 ve üst tarafına 6 olmak üzere toplamda 12 vuruş yapılarak bir numuneye standart Proktor deneyi enerjisinin iki katı enerji uygulanmıştır.

Çapı 5,00 cm, yüksekliği 10,00 cm olan silindirik numune için vuruş sayısı aşağıdaki şekilde belirlenmiştir:

Burada standart Proktor enerjisi $592,7 \text{ kJ/m}^3$, kalıp hacmi $196,35 \text{ cm}^3$, tokmak ağırlığı 2,495 kg, tokmağın düşme yüksekliği 30,48 cm tabaka sayısı 1 olarak kabul edilmiştir. Formülde verilen değerler yerine yazıldığında vuruş sayısı 15,6 bulunmuş, bir üst rakama yuvarlanarak 16 vuruş yapılmıştır. Böylece kalıbın alt tarafına 16 ve üst tarafına 16 olmak üzere toplamda 32 vuruş yapılarak bir numuneye standart Proktor deneyi enerjisinin iki katı enerji uygulanmıştır (Şekil 4.20.).



Şekil 4.20. Sıkıştırma kalıbında numune sıkıştırılması.

BÖLÜM 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde Kocaeli ilinden alınan kil zemin numunesine fiber katkısının drenajsız kayma direncine etkisi incelenmiştir. Kil, polipropilen fiberin mikro yapısı, kil-fiber etkileşimi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri ve serbest basma deneyi sonuçları irdelenmiştir.

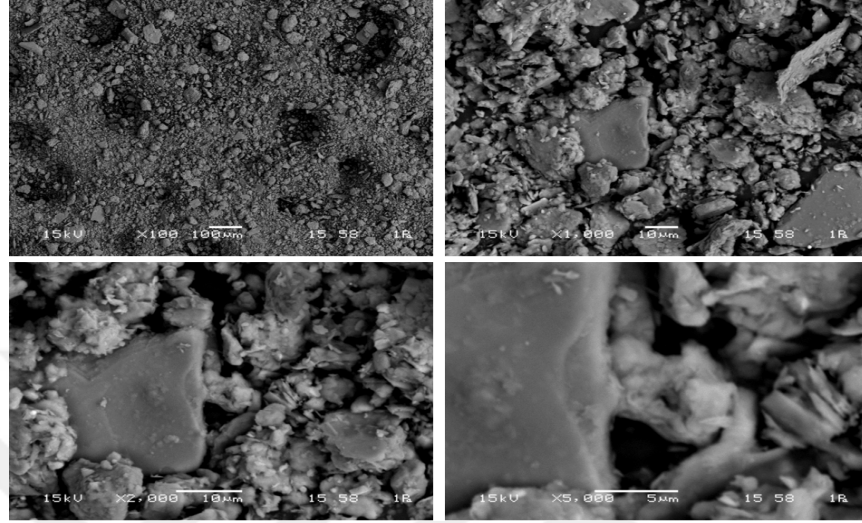
5.1. Kilin ve Polipropilen Fiberin Mineral ve Mikro Yapı Özellikleri

Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde kil zemini ve polipropilen fiberi, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) yardımıyla taranarak mikroskobik yapısı görüntülenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (Şekil 5.1.) elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak görüntü elde etmektedir.



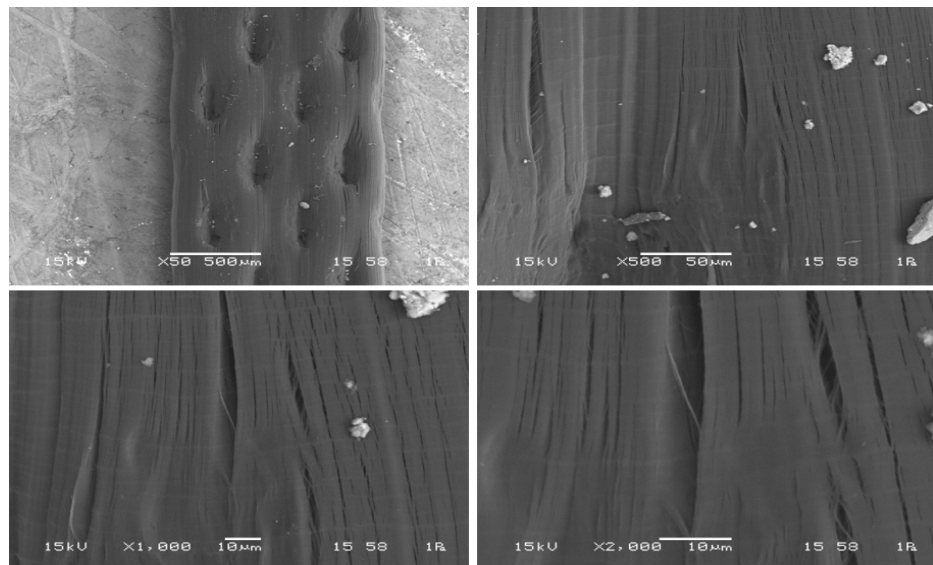
Şekil 5.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).

Kil zeminin yüzeyinin iletken bir malzeme olan altın ile kaplanması sonrasında taramalı elektron mikroskopunda farklı çözünürlükte (x100, x1000, x2000 ve x5000) elde edilen mikroskobik yapısı Şekil 5.2.'de görülmektedir.



Şekil 5.2. Kil zeminin mikroskobik yapısı (x100, x1000, x2000 ve x5000).

Polipropilen fiberin mikroskobik yapısı (x50, x500, x1000 ve x2000) ise Şekil 5.3.'te görülmektedir. Burada imalat sırasında oluşturulmuş pürüzlerin varlığının kenetlenmenin bariz bir şekilde sağlanacağını göstergesi olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır.



Şekil 5.3. Polipropilen fiberin mikroskobik yapısı (x50, x500, x1000 ve x2000).

5.2. Serbest Basma Deneyinde Makroskobik Davranış

Serbest basma deneyi (UC) yapılan numunelerden ikisinin görüntüsü Şekil 5.4.'te gösterilmektedir. Tez çalışmasında 90 tanesi 3,5 cm çaplı ve 210 tanesi 5,00 cm çaplı olmak üzere toplam 300 tane silindirik numune üzerinde serbest basma deneyi yapılmıştır. Silindirik numunelerin tamamı Şekil 5.5.'da gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Silindirik numunelerin serbest basma sonrası oluşan kırılma yüzeyleri.



Şekil 5.5. 300 adet silindirik numune.

5.3. Serbest Basma Deneyinde Elde Edilen Sonuçlar

Deneyisel çalışmada 20 tanesi fiber katkısız kil zemin numunesi, 280 tanesi farklı boydaki fiberlerin zemine farklı oranlarda eklenerek oluşturulmuş karışım numuneleri olmak üzere toplamda 300 tane numune üzerinde serbest basma deneyi yapılmıştır. Numunelerin fiziksel özelliklerine ait ortalama bilgiler Tablo 5.1.'de gösterilmektedir. Tablo 5.1.'de dikkat çeken husus artan fiber oranıyla birlikte birim hacim ağırlıklarının ve doygunluk derecesinin düşmesi, boşluk oranının ise artması olmaktadır. Fiberin zemine oranla birim hacim ağırlığının düşük olması bu duruma sebep olmaktadır.

Tablo 5.1. Serbest basma deneyi silindirik numunelerinde ortalama fiziksel özellikler.

	Çap (cm)	Yükseklik (cm)	$w_{doğal}$ (gr)	w (%)	e_0	γ_n (kN/m ³)	Sr (%)
DOĞAL	3,50	7,05	150,07	14,96	0,41	21,71	98,35
10 mm %0,5	3,50	7,08	149,82	15,07	0,42	21,57	96,79
10 mm %1	3,50	7,10	148,87	14,59	0,43	21,37	92,17
10 mm %1,5	3,50	7,12	148,24	14,31	0,44	21,23	89,14
10 mm %2	3,50	7,16	147,60	14,50	0,45	21,01	86,86
20 mm %0,5	3,50	7,14	149,72	16,16	0,45	21,39	97,89
20 mm % 1	3,50	7,12	148,57	15,64	0,45	21,28	94,48
20 mm % 1,5	3,50	7,13	147,95	15,11	0,45	21,15	90,87
20 mm % 2	3,50	7,20	147,50	15,02	0,47	20,88	87,04
DOĞAL	5,04	10,09	441,08	15,07	0,43	21,50	95,47
10 mm %0,5	5,05	10,05	439,02	15,26	0,44	21,40	94,88
10 mm %1	5,05	10,10	438,51	14,56	0,44	21,26	90,39
10 mm %1,5	5,05	10,16	435,74	14,90	0,46	21,01	88,27
10 mm %2	5,05	10,08	428,96	14,26	0,46	20,85	83,90
20 mm %0,5	5,05	10,02	438,78	14,68	0,43	21,45	93,55
20 mm %1	5,05	10,03	432,58	14,77	0,45	21,12	89,24
20 mm %1,5	5,05	10,08	427,04	14,03	0,47	20,76	82,00
20 mm %2	5,05	10,10	426,14	14,57	0,48	20,67	82,75
30 mm %0,5	5,05	10,05	441,56	14,75	0,42	21,51	94,25
30 mm %1	5,05	10,17	440,56	14,44	0,44	21,22	89,54
30 mm %1,5	5,05	9,99	427,40	14,62	0,46	20,96	86,74
30 mm %2	5,05	10,12	425,34	14,75	0,49	20,59	82,46
40 mm %0,5	5,05	10,02	438,66	14,73	0,43	21,45	93,74
40 mm %1	5,05	10,12	438,17	14,78	0,44	21,21	90,57
40 mm %1,5	5,05	10,01	424,44	14,66	0,47	20,77	84,35
40 mm %2	5,05	10,19	425,90	14,60	0,49	20,47	80,57
50 mm %0,5	5,05	10,06	440,72	15,01	0,43	21,45	93,93
50 mm %1	5,05	10,09	439,14	14,43	0,43	21,32	90,90
50 mm %1,5	5,05	10,22	436,96	14,59	0,46	20,94	86,35
50 mm %2	5,05	9,95	421,54	14,53	0,47	20,75	83,73

Tablo 5.2.'de 3,50 m çaplı numunelerin kırılma anındaki boy değişim yüzdesi ve serbest basma dayanımı gösterilmektedir.

Tablo 5.2. Serbest basma deneylerinde dayanım ve kırılmada deformasyon değerleri (Çap: 3,50 cm).

Doğal	ϵ_z	5,39	5,66	4,26	4,68	4,26	5,31	5,54	5,43	7,09	5,99
	σ	354,05	350,11	332,42	366,61	372,23	378,95	345,63	371,58	342,85	342,03
10 mm %0,5	ϵ_z	6,11	5,21	5,39	5,36	5,25	4,93	4,23	5,63	5,64	399,41
	σ	445,06	378,37	395,36	390,56	413,68	397,28	401,22	380,60	398,23	399,41
10 mm %1	ϵ_z	5,67	5,59	5,36	5,63	5,63	5,64	6,62	6,53	5,64	4,23
	σ	428,51	399,41	405,32	416,93	409,05	412,94	378,57	414,88	423,73	443,00
10 mm %1,5	ϵ_z	4,21	4,65	5,21	4,21	5,49	5,59	5,63	5,49	5,20	4,20
	σ	445,11	468,80	443,40	458,05	422,47	397,45	453,23	457,84	425,70	431,22
10 mm %2	ϵ_z	5,35	4,20	5,31	5,59	5,32	4,16	4,94	4,20	4,20	5,17
	σ	426,01	421,26	432,09	443,57	456,66	455,29	443,69	471,03	483,97	470,22
20 mm %0,5	ϵ_z	7,03	7,04	6,75	5,59	5,84	5,59	5,87	5,59	5,37	6,55
	σ	345,97	338,20	344,11	316,98	316,15	341,51	313,13	326,82	324,61	323,47
20 mm %1	ϵ_z	5,27	5,55	5,40	5,06	5,67	4,20	4,78	4,21	5,23	6,91
	σ	373,21	392,73	381,54	372,08	372,60	387,40	356,33	377,37	369,42	360,94
20 mm %1,5	ϵ_z	5,30	4,27	4,87	5,59	5,97	4,86	6,99	5,60	5,59	5,26
	σ	447,92	482,64	473,69	403,33	448,64	459,88	455,37	463,16	461,23	468,76
20 mm %2	ϵ_z	5,59	5,63	6,65	6,68	4,23	5,56	5,56	5,42	5,14	7,07
	σ	449,49	510,09	430,85	348,27	451,00	436,88	506,54	475,85	406,28	467,52

Tablo 5.2. incelendiğinde kil zemine polipropilen fiberin farklı oran ve uzunlukta eklenmesiyle drenajsız kayma direncinin iyileştiği kanısı ortaya çıkmaktadır. İlk bakışta fiber oranının %1,5 ve %2 olduğu durumlarda daha büyük basma dayanımlarının elde edildiği görülmektedir. Numunelere tek tek bakıldığında, doğal numunelerde en yüksek dayanım 378,95 kPa iken, fiber katkılı numunelerde en yüksek değer, %2 oranında 20 mm fiber katılmış numunede 510,09 kPa olarak bulunmuştur.

Tablo 5.3.'de 5,00 cm çaplı numunelerin kırılma anındaki boy değişim yüzdesi ve serbest basma dayanımı gösterilmektedir.

Numunelere tek tek bakıldığında, doğal numunelerde en yüksek dayanım 391,75 kPa iken, fiber katkılı numunelerde en yüksek değer, %2 oranında 30 mm fiber katılmış numunede 523,05 kPa olarak bulunmuştur. 5,00 cm çaplı numunelerde 20 mm %2 fiber katkısı taşıyan numunelerde en yüksek değer 476,23 kPa olarak elde edilmiştir.



Tablo 5.3. Serbest basma deneylerinde dayanım ve kırılmada deformasyon değerleri (Çap: 5,00 cm).

Doğal	ϵ_z	5,76	5,90	7,38	5,67	6,01	5,00	6,14	5,01	6,44	5,35
	σ	391,75	388,99	357,65	365,92	356,17	345,28	347,68	341,47	354,08	352,53
10 mm %0,5	ϵ_z	3,99	4,65	4,55	4,95	4,96	4,78	4,00	4,00	4,00	5,47
	σ	309,10	353,21	297,57	377,26	335,00	312,80	310,11	311,53	336,47	356,31
10 mm %1	ϵ_z	5,54	4,90	3,91	3,96	3,98	4,85	3,96	5,53	5,64	4,96
	σ	393,60	428,27	454,26	434,89	442,95	413,75	411,87	412,21	410,31	404,28
10 mm %1,5	ϵ_z	5,80	5,14	4,66	4,26	5,29	4,77	3,80	4,94	4,95	3,98
	σ	394,47	378,86	345,81	371,39	397,67	371,79	380,37	364,48	324,12	383,50
10 mm %2	ϵ_z	5,73	3,99	3,99	5,54	4,00	6,44	5,52	5,95	4,98	5,45
	σ	364,99	378,66	431,86	366,41	403,57	375,10	358,49	408,03	389,97	401,70
20 mm %0,5	ϵ_z	3,98	5,10	4,66	4,97	5,29	4,00	4,00	5,17	4,67	4,19
	σ	415,27	355,33	348,25	363,91	326,26	334,54	383,42	374,95	371,23	321,45
20 mm %1	ϵ_z	3,98	4,98	4,97	5,70	4,00	4,00	5,03	4,96	4,98	3,98
	σ	393,76	244,32	380,51	417,59	390,60	425,12	403,04	345,92	475,34	479,38
20 mm %1,5	ϵ_z	6,05	4,66	5,91	4,76	4,94	3,96	5,10	3,88	4,00	3,96
	σ	423,09	444,55	344,62	442,20	450,86	501,06	476,15	487,09	494,60	481,86
20 mm %2	ϵ_z	7,68	7,01	5,00	7,88	6,99	5,40	5,00	6,23	5,94	5,64
	σ	413,88	434,56	476,23	442,43	460,16	467,10	407,89	442,42	416,06	422,08
30 mm %0,5	ϵ_z	4,56	5,07	4,96	4,00	5,20	4,93	4,85	4,38	5,94	5,48
	σ	443,43	381,03	438,18	391,59	434,95	389,20	359,60	424,88	415,59	380,80
30 mm %1	ϵ_z	3,96	5,74	5,31	5,04	5,88	5,79	5,88	4,86	5,78	5,38
	σ	455,00	459,31	476,56	466,03	468,47	453,41	466,12	465,03	475,58	468,63
30 mm %1,5	ϵ_z	8,81	3,94	4,98	4,67	4,03	6,92	5,05	5,01	5,25	5,15
	σ	506,33	445,99	475,85	465,92	454,68	483,31	481,15	485,17	444,66	445,58
30 mm %2	ϵ_z	6,92	7,77	7,50	6,51	7,90	7,92	5,01	5,05	8,87	5,03
	σ	487,46	483,04	523,05	452,27	491,54	508,44	482,80	447,96	482,28	486,97
40 mm %0,5	ϵ_z	4,45	4,82	5,21	4,85	4,96	3,96	5,20	6,04	4,98	5,63
	σ	425,42	389,64	388,26	386,20	398,11	376,85	400,40	407,65	401,83	449,48
40 mm %1	ϵ_z	4,95	3,95	4,71	5,52	5,84	4,48	4,90	5,36	5,63	5,94
	σ	430,00	398,96	433,99	388,21	440,02	409,64	394,09	400,21	399,51	404,32
40 mm %1,5	ϵ_z	7,26	4,78	3,98	4,95	4,97	4,04	4,04	6,20	5,62	6,09
	σ	430,38	436,42	425,07	425,18	407,07	424,46	452,73	441,14	461,79	454,79
40 mm %2	ϵ_z	4,32	7,21	6,73	7,92	6,67	4,78	5,99	7,77	5,15	7,90
	σ	463,04	407,66	417,17	445,91	456,65	432,62	428,04	462,78	464,05	493,39
50 mm %0,5	ϵ_z	3,97	4,63	4,36	4,41	4,90	4,42	3,96	5,74	6,01	4,77
	σ	384,52	319,01	319,62	424,74	447,24	381,74	415,25	340,72	377,76	404,59
50 mm %1	ϵ_z	4,92	5,94	5,96	5,43	5,79	5,97	5,00	5,97	5,85	5,70
	σ	387,02	402,44	442,66	411,24	377,22	390,58	359,04	405,60	387,33	399,69
50 mm %1,5	ϵ_z	4,92	6,18	5,53	6,83	5,79	5,73	5,01	4,12	5,88	6,18
	σ	418,99	402,84	443,24	396,31	462,83	401,47	389,37	435,61	424,33	395,79
50 mm %2	ϵ_z	6,94	8,16	8,70	5,00	4,12	5,88	8,82	8,01	6,70	6,30
	σ	417,17	437,86	416,74	442,51	446,11	471,76	460,21	477,64	498,40	392,95

Kil ve polipropilen katkılı numunelerin fiber boyu ve oranına göre dayanımında oluşan orantısal değişimler Tablo 5.4.'te gösterilmiştir. Bu tablonun hazırlanışında, ilk olarak her seride elde edilen ortalama değerler dikkate alınmıştır. Daha sonra ortalama değerlerin %90'ından daha az ve %110'undan daha fazla olan değerler çıkarılarak düzeltilmiş ortalamalar hesaplanmıştır.

Tablo 5.4. Numunelerin dayanımlarında fiber katkısı ve değişim oranları.

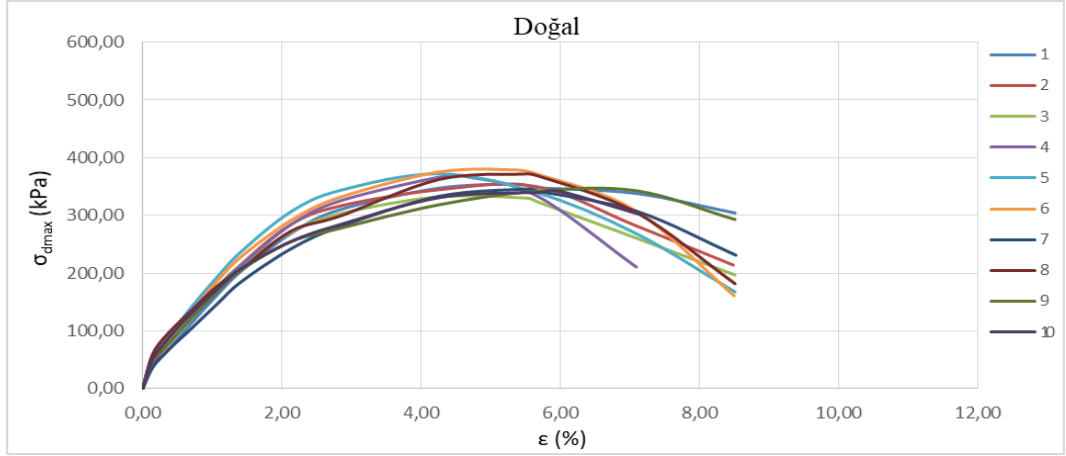
Fiber Boyu (mm)	Fiber Oranı (%)	$\sigma_{d \text{ ort}}$ (kPa)	Dayanım Artışı (%)	$\sigma_{d \text{ ort, düzeltilmiş}}$ (kPa)	Dayanım Artışı (%)
0	0	355,65	-	355,65	-
10	0,5	399,98	12,46	394,97	11,06
10	1	413,23	16,19	413,23	16,19
10	1,5	440,33	23,81	440,33	23,81
10	2	450,38	26,64	450,38	26,64
20	0,5	329,1	-7,47	329,1	-7,47
20	1	374,36	5,26	374,36	5,26
20	1,5	456,46	28,35	462,37	30,01
20	2	448,28	26,05	445,41	25,24
0	0	360,15	-	360,15	-
10	0,5	329,94	-8,39	324,68	-9,85
10	1	420,64	16,80	420,64	16,80
10	1,5	371,25	3,08	376,48	4,53
10	2	387,88	7,70	382,99	6,34
20	0,5	359,46	-0,19	357,24	-0,81
20	1	395,56	9,83	401,77	11,56
20	1,5	454,61	26,23	462,55	28,43
20	2	438,28	21,69	438,28	21,69
30	0,5	405,93	12,71	405,93	12,71
30	1	465,41	29,23	465,41	29,23
30	1,5	468,86	30,18	468,86	30,18
30	2	484,58	34,55	484,58	34,55
40	0,5	402,38	11,73	397,15	10,27
40	1	409,9	13,81	409,9	13,81
40	1,5	435,9	21,03	435,9	21,03
40	2	447,13	24,15	441,99	22,72
50	0,5	381,52	5,93	392,77	9,06
50	1	396,28	10,03	391,13	8,60
50	1,5	417,08	15,81	411,99	14,39
50	2	446,14	23,88	446,25	23,91

Tablo 5.4. incelendiğinde polipropilen fiberin örneklerin çoğunda drenajsız kayma direncini arttırdığı görülmektedir. En yüksek artış %2 oranında 30 mm fiber katılmış 5,00 cm çapa 10,00 cm yüksekliğe sahip silindirik numunede meydana gelmiş olup drenajsız kayma direnci 360,15 kPa değerinden %34,55 artarak 484,58 kPa olarak bulunmuştur.

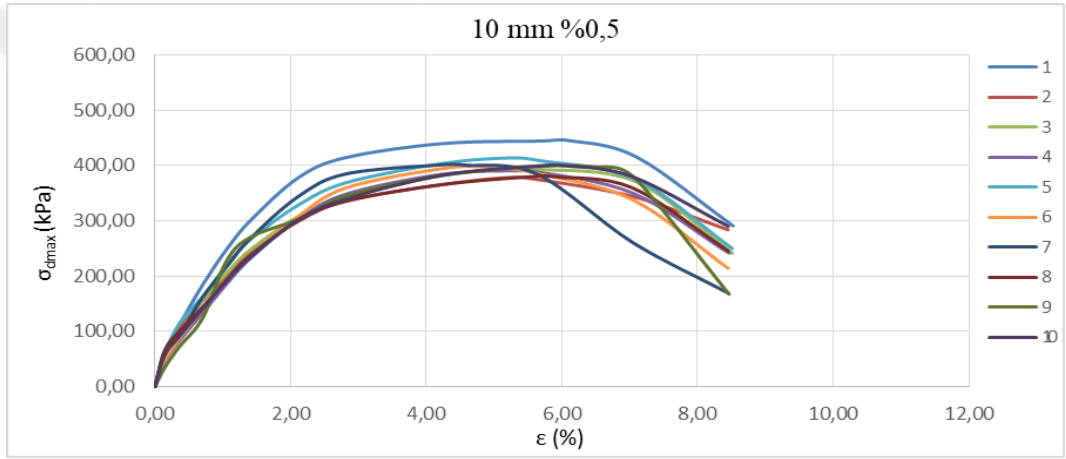
5.3.1. Gerilme ve şekil değiştirme ilişkisi

Optimum su muhtevasında hazırlanan numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafikleri Şekil 5.6. ile Şekil 5.35. arasında gösterilmektedir. Şekil 5.6.'da gösterilen 3,5 cm çaplı doğal numunede serbest basma dayanımına %5 civarında deformasyonda ulaşıldığı görülmektedir. Şekil 5.7. - Şekil 5.14. arasında 3,5 cm çaplı fiber katkılı numunelerin sonuçları sunulmaktadır. Buna göre fiber oranı arttıkça kırılma anındaki boy değişim oranının %4'e doğru çekildiği görülmektedir. Aynı zamanda numunede maksimum direnç aşıldıktan sonra fiber - zemin kenetlenmesi sayesinde direnç azalımının yavaşladığı da ortaya çıkmaktadır. Bu etkinin 20 mm boylu fiber katkılı numunelerde daha belirgin olduğu görülmektedir. Fiber - zemin temas alanının artması sayesinde bu durumun gerçekleştiği söylenebilir.

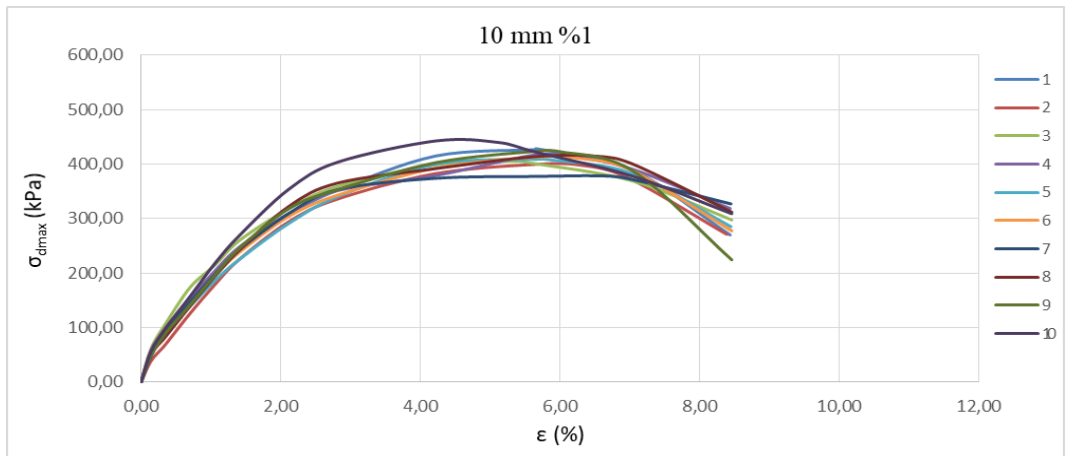
Şekil 5.14.'de 20 mm boylu fiberin %2 oranında kullanıldığı numunelerde eğrilerin saçılımının daha fazla olduğu görülmektedir. Kısa boylu fiberlerin zemin içinde daha rahat yerleşmesi ve yönelimlerin daha kolay olmasının sonuçların birbirine yakın çıkmasını sağladığı söylenebilir. Fiber boyu uzadıkça ve oranı arttıkça fiberlerin numune içinde homojen dağılım ve yerleşim problemi ortaya çıkmakta ve sonuçlar birbirinden uzaklaşabilmektedir.



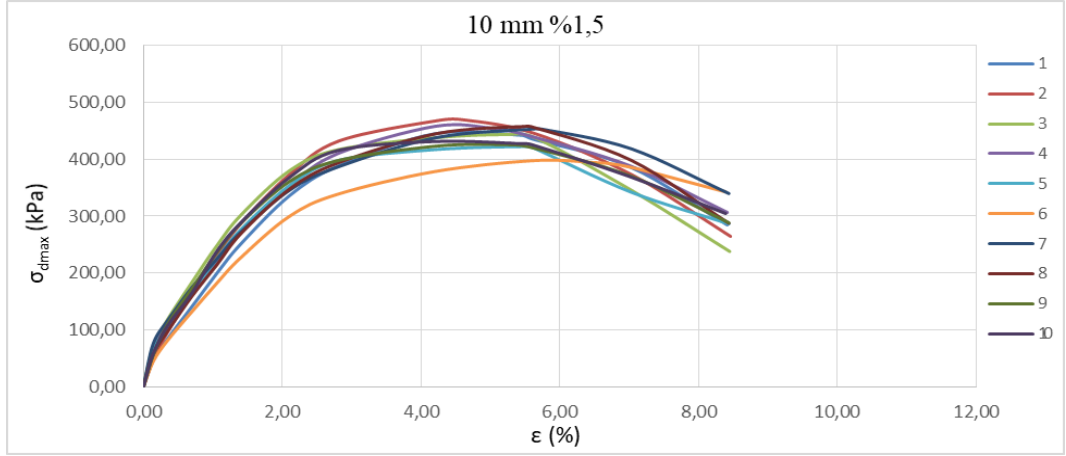
Şekil 5.6. 3,5 cm çaplı doğal zemin numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafiği.



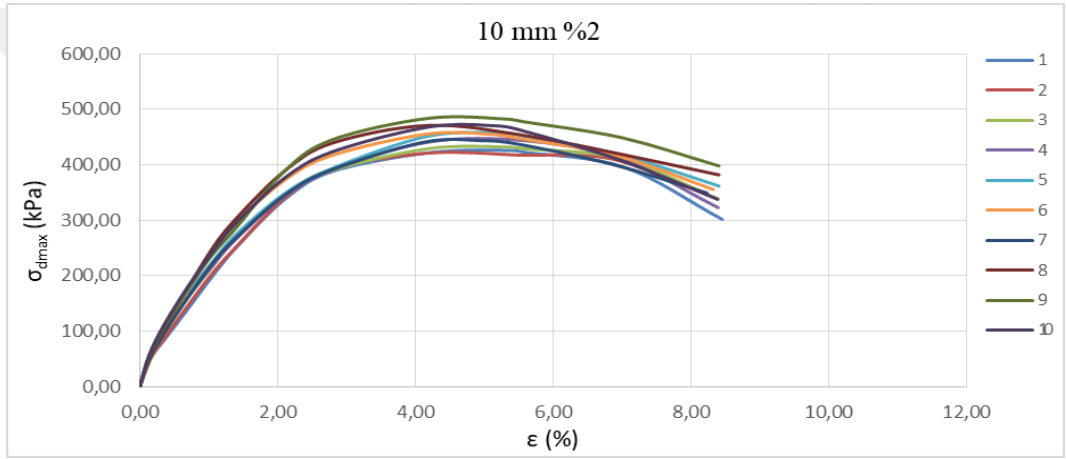
Şekil 5.7. %0,5 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 3,5 cm).



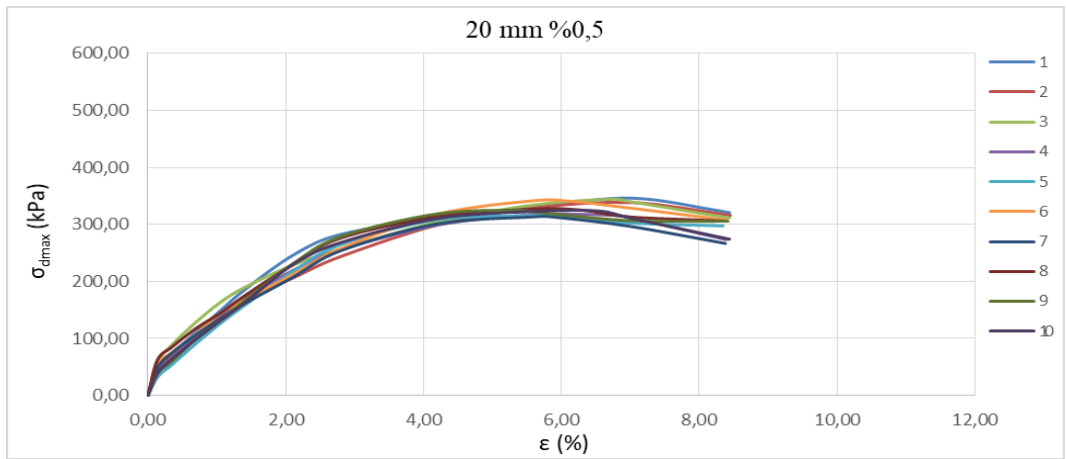
Şekil 5.8. %1 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 3,5 cm).



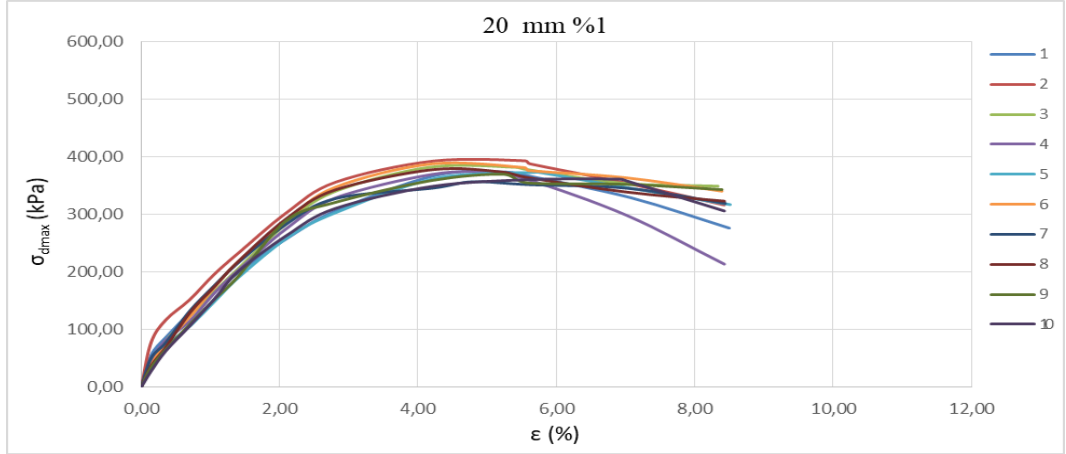
Şekil 5.9. %1,5 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 3,5 cm).



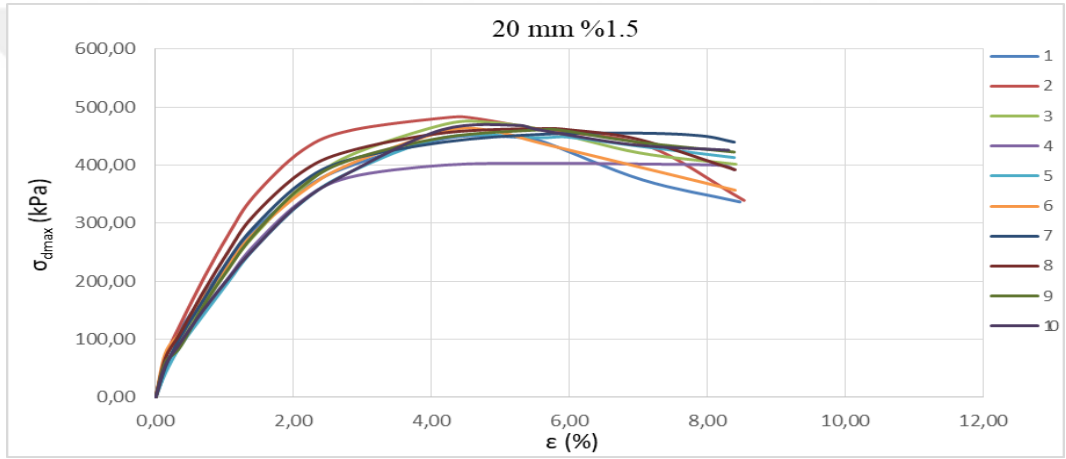
Şekil 5.10. %2 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 3,5 cm).



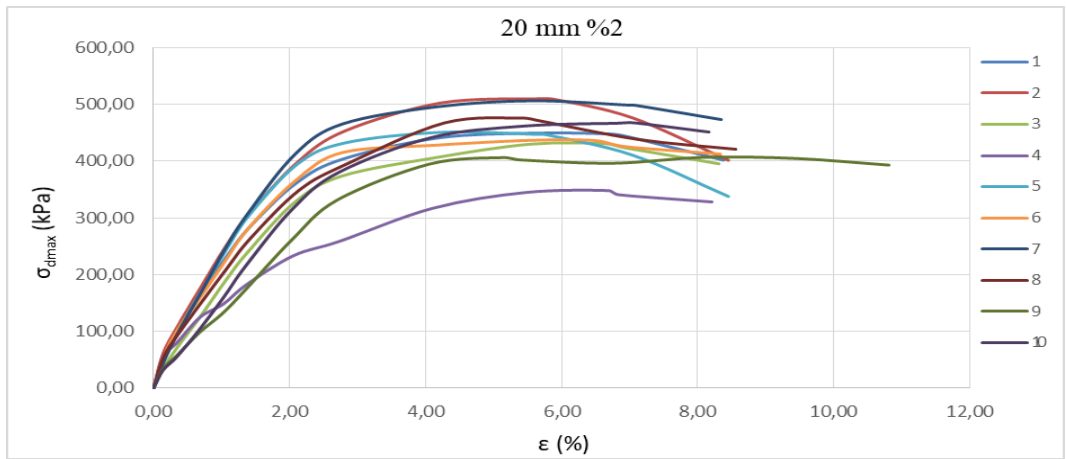
Şekil 5.11. %0,5 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 3,5 cm).



Şekil 5.12. %1 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 3,5 cm).



Şekil 5.13. %1,5 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 3,5 cm).

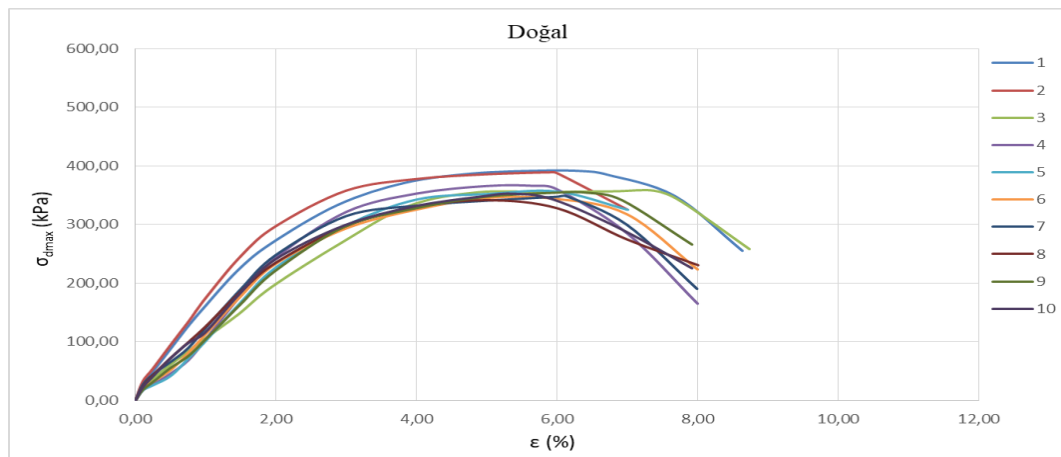


Şekil 5.14. %2 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 3,5 cm).

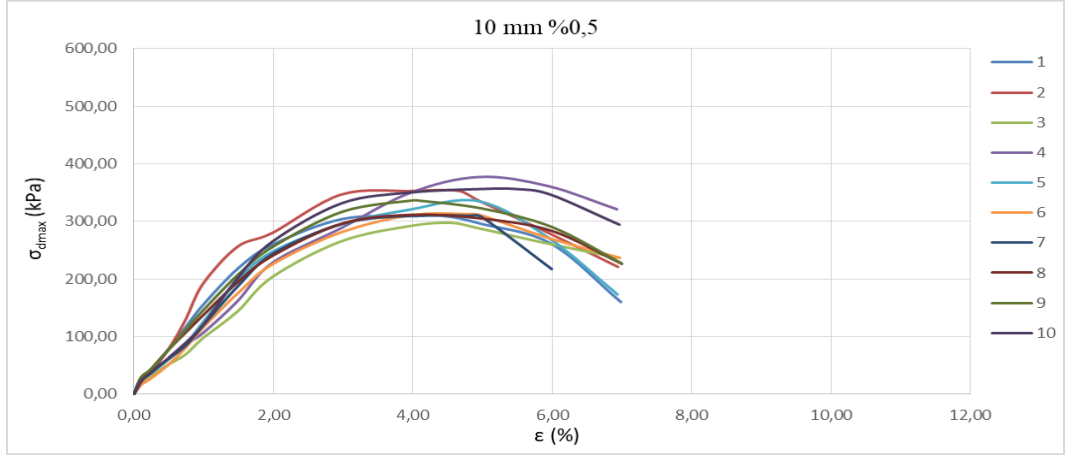
Şekil 5.15. ile Şekil 5.35. arasında 5,0 cm çaplı numunelere ait gerilme - deformasyon grafikleri sunulmaktadır. 5,0 cm çaplı numunelerde 10 mm ve 20 mm boyundaki fiberlere ek olarak 30 mm - 40 mm ve 50 mm boylu fiberleri kullanmak mümkün olmuştur. Ancak burada özellikle 50 mm boylu fiberlerde numune içinde homojen dağılımı sağlamak zorlaşmış ve bazı fiberlerin numune dışına uzandığı görülmüştür. Bu da numune boyutlarının sonuçları etkilediğini göstermektedir.

3,5 cm çaplı numunelere benzer şekilde 5,0 cm çaplı doğal numunelerde de maksimum dayanıma %5 - %6 civarında ulaşıldığı görülmektedir. Fiber oranı arttıkça fiber boyu farketmeksizin kırılmadaki deformasyon oranının arttığı görülmüş, aynı zamanda numune yenildikten sonraki dayanım düşüşü neredeyse ortadan kalkmıştır. Fiber - zemin etkileşiminin devam etmesi numunelerin davranışını gevrek kırılmadan sünek kırılmaya doğru değiştirmiştir.

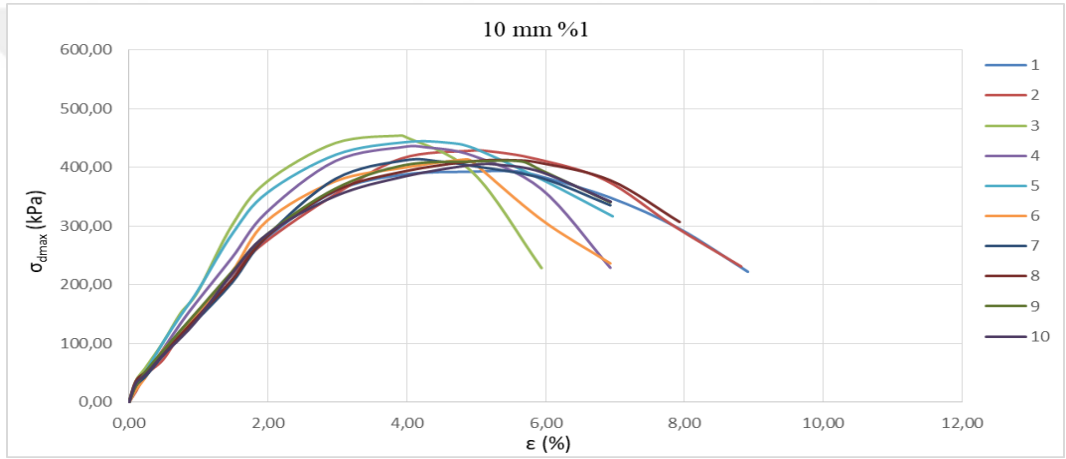
En yüksek dayanım 30 mm boylu fiber katkılı numunelerde görülmektedir. Fiber boyu arttıkça fiber - zemin temas alanı artmakta, bu da olumlu yönde etki ederek dayanımın artmasını sağlamaktadır. Ancak artan fiber boyu ile fiberlerin numune içinde homojen dağılımı zorlaşmakta ve fiberlerin yönelimi homojen olmaktan çıkarak öbeklenme durumuna geçmektedir. Bu da 40 mm ve 50 mm boylu fiber katkılı numunelerde dayanımda düşüşe neden olmaktadır.



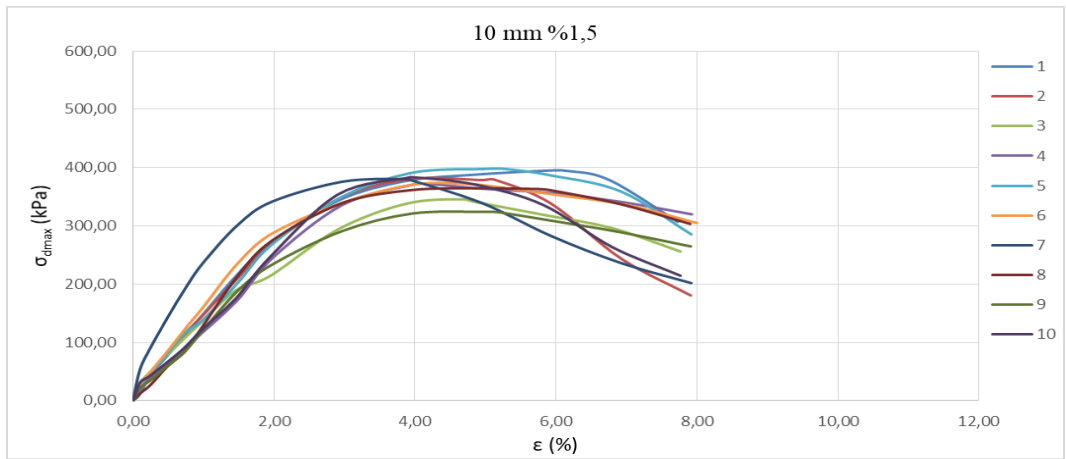
Şekil 5.15. 5,0 cm çaplı doğal kil numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği.



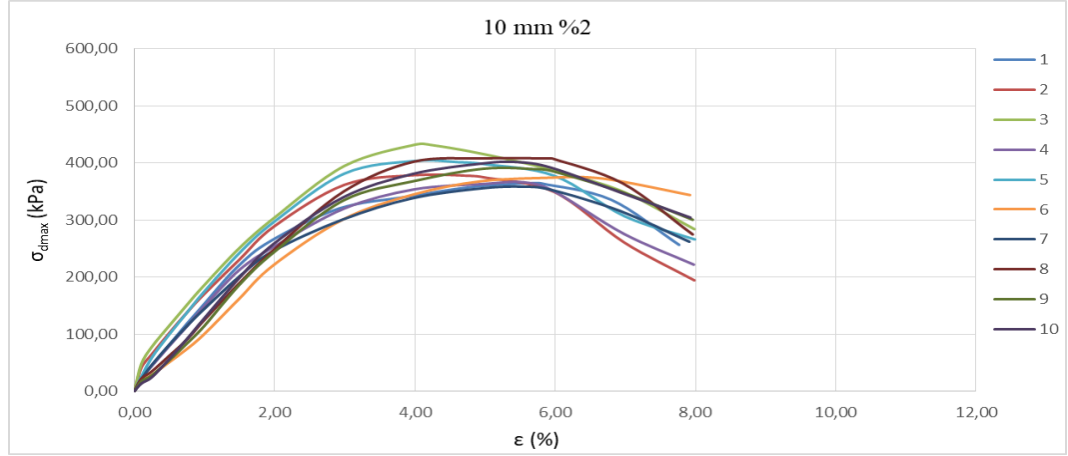
Şekil 5.16. %0,5 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).



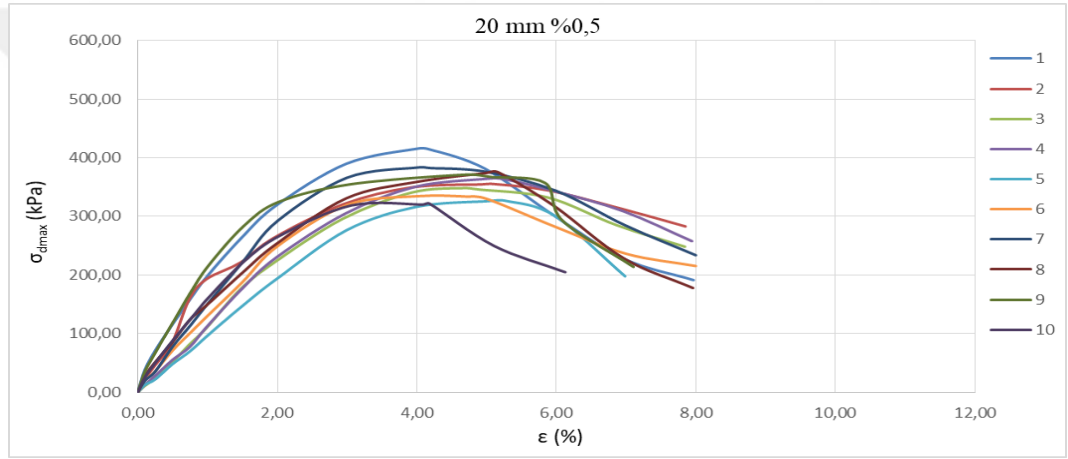
Şekil 5.17. %1 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).



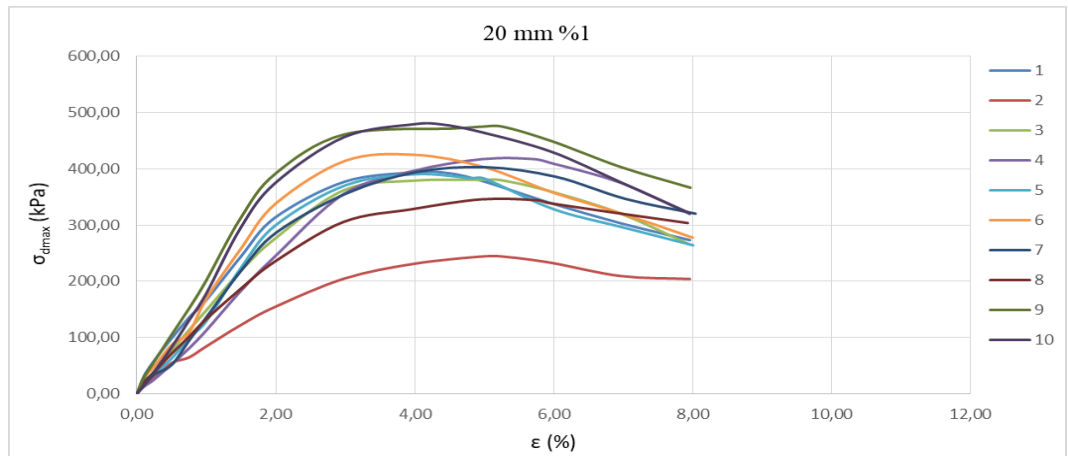
Şekil 5.18. %1,5 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).



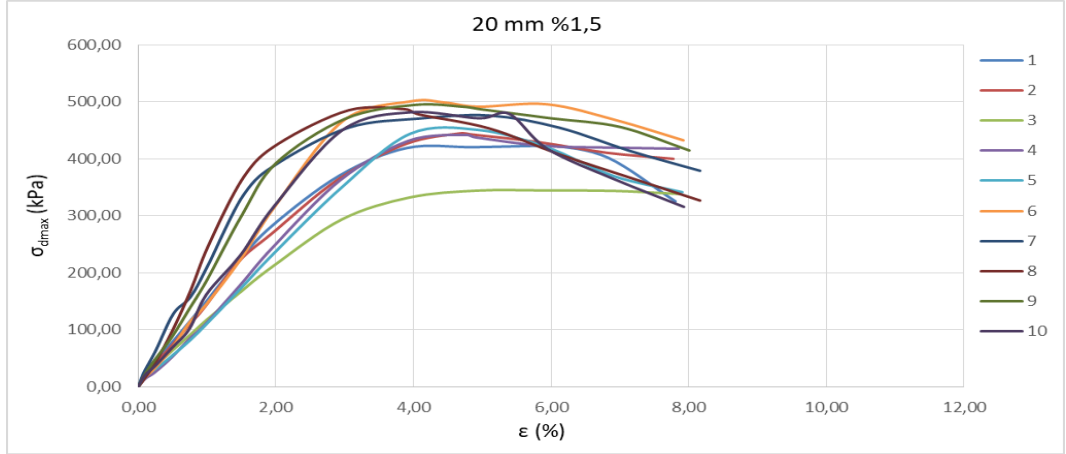
Şekil 5.19. %2 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).



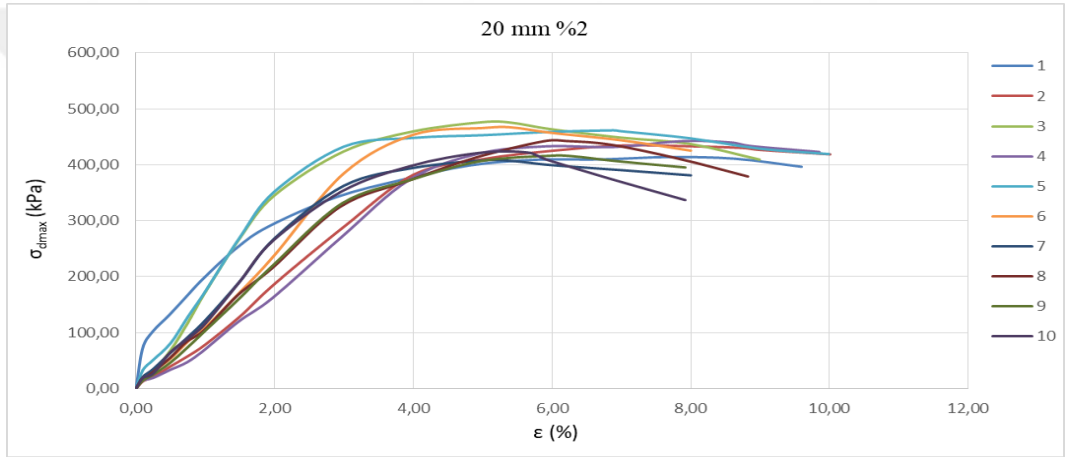
Şekil 5.20. %0,5 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).



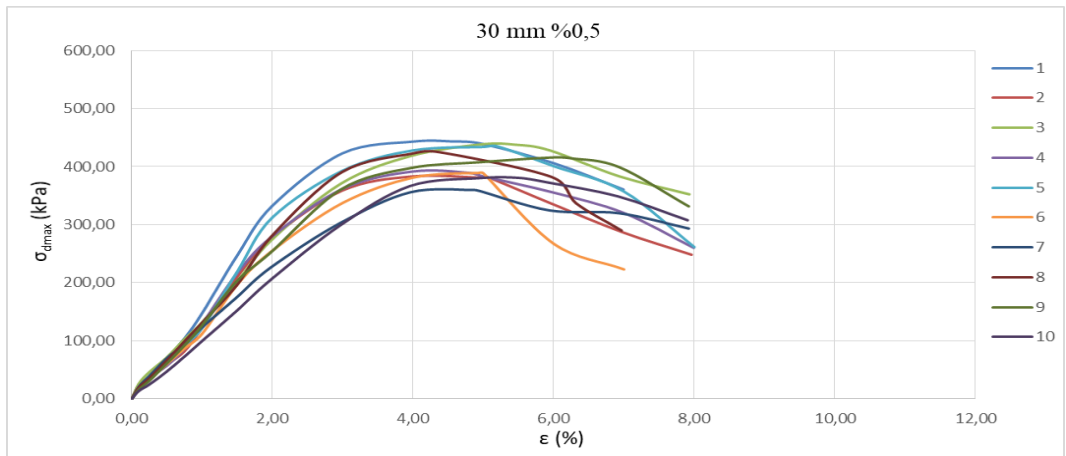
Şekil 5.21. %1 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).



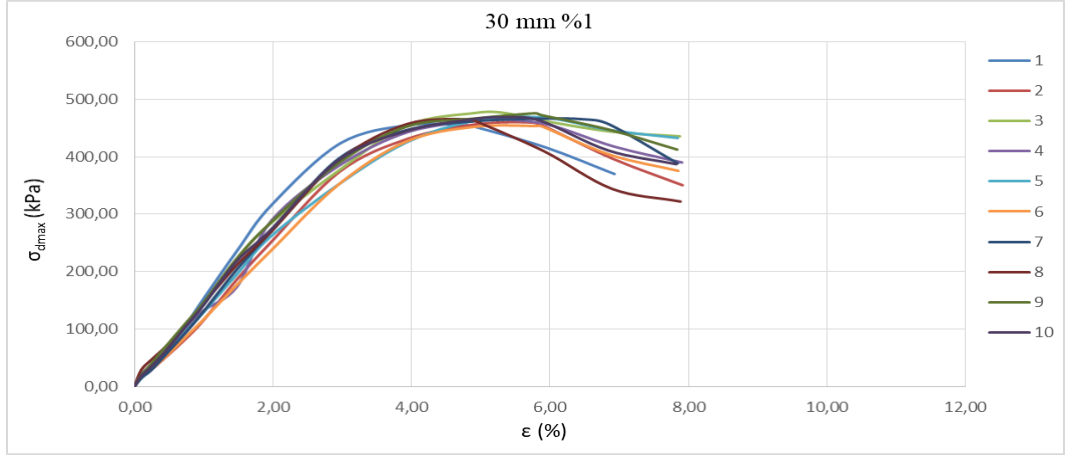
Şekil 5.22. %1,5 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).



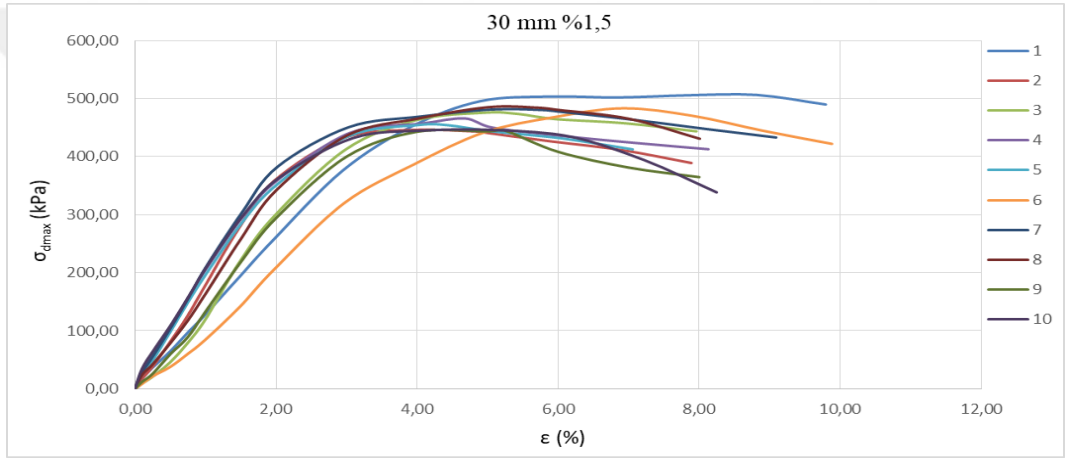
Şekil 5.23. %2 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).



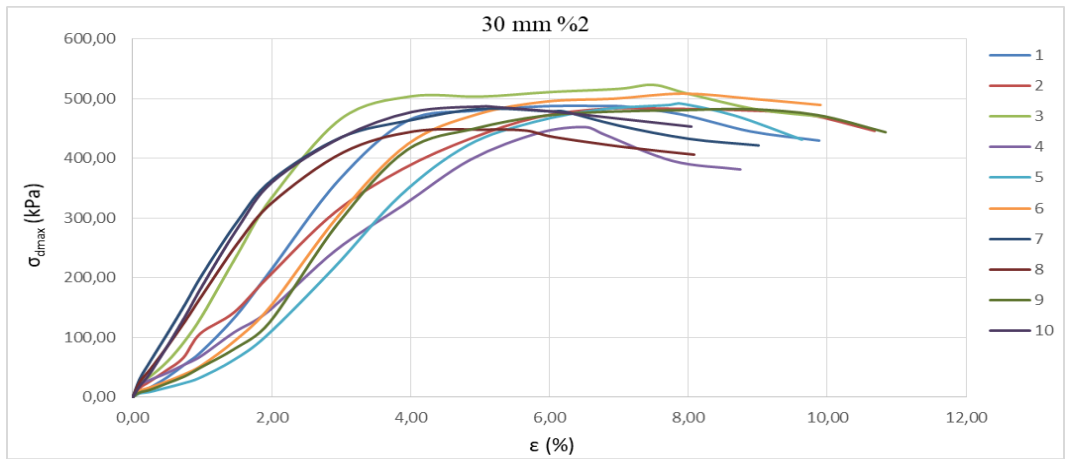
Şekil 5.24. %0,5 oranında 30 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).



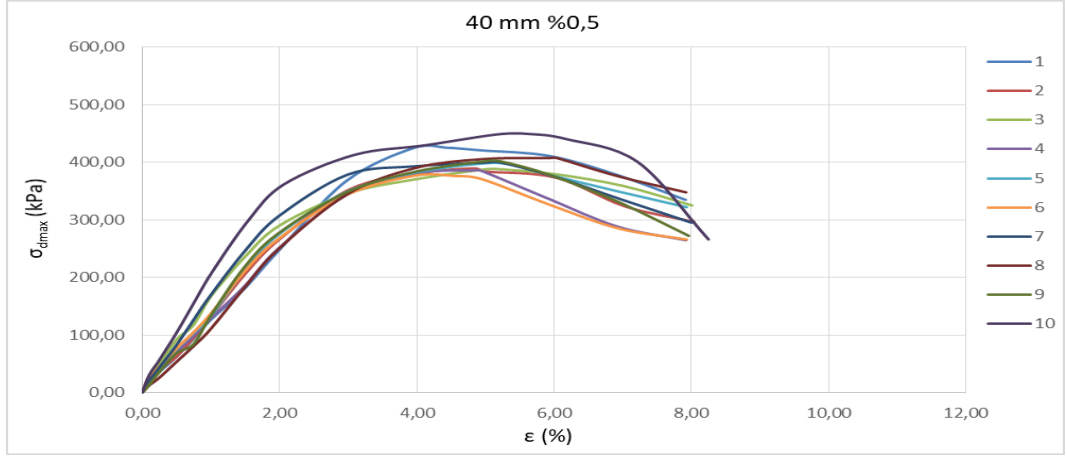
Şekil 5.25. %1 oranında 30 mm fiber katkı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).



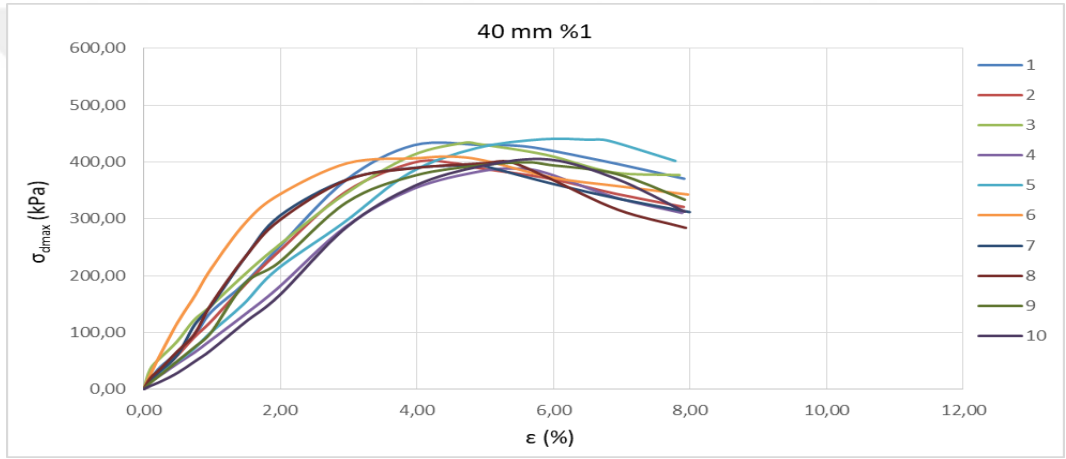
Şekil 5.26. %1,5 oranında 30 mm fiber katkı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).



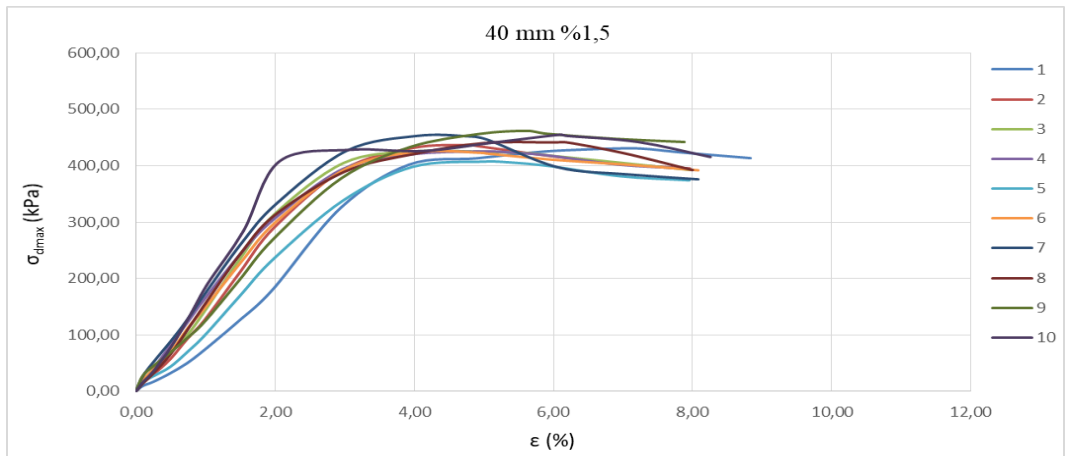
Şekil 5.27. %2 oranında 30 mm fiber katkı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).



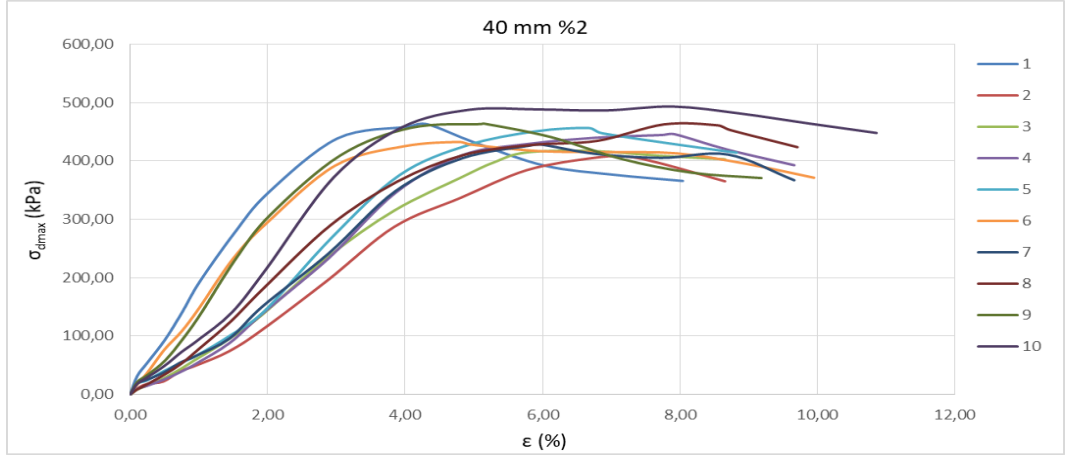
Şekil 5.28. %0,5 oranında 40 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).



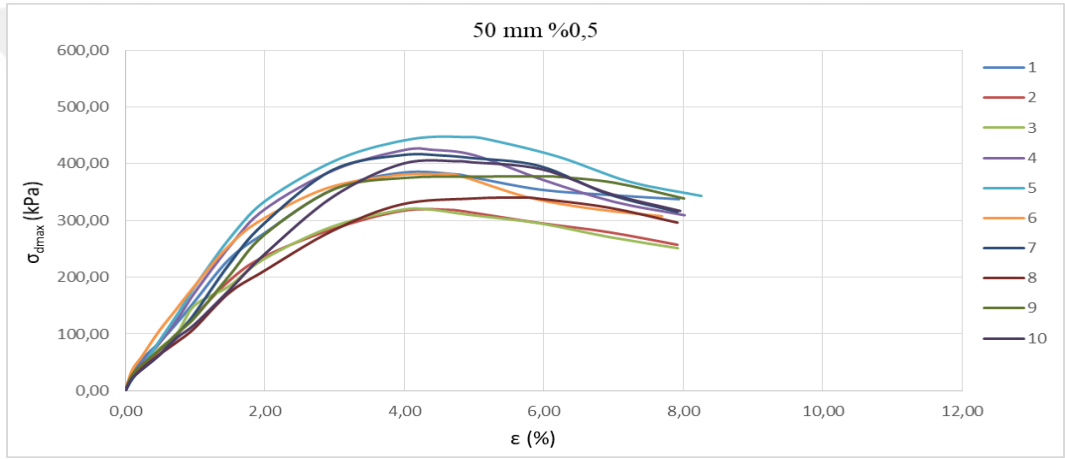
Şekil 5.29. %1 oranında 40 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).



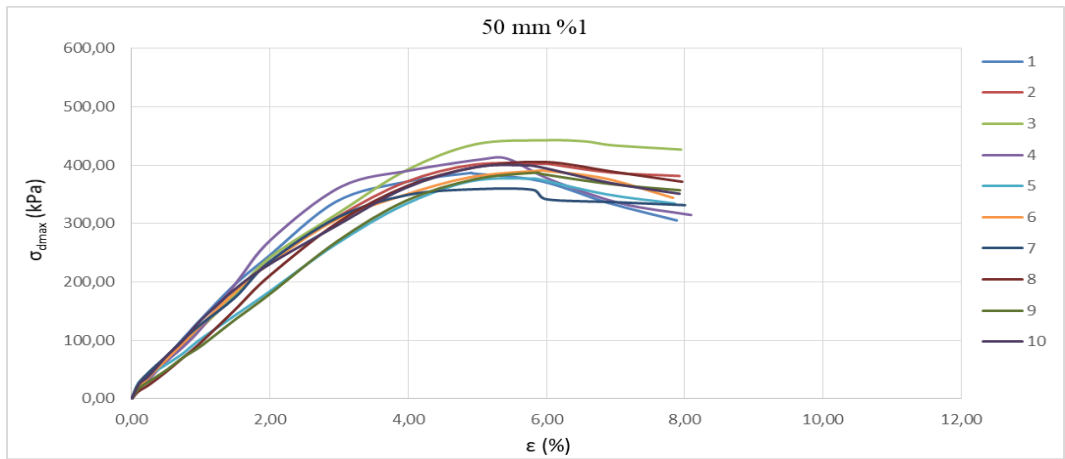
Şekil 5.30. %1,5 oranında 40 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).



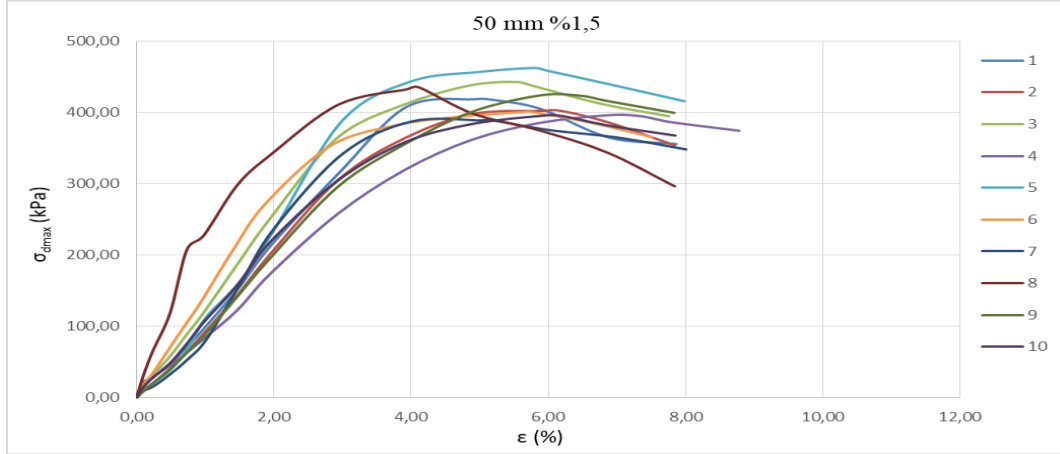
Şekil 5.31. %2 oranında 40 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).



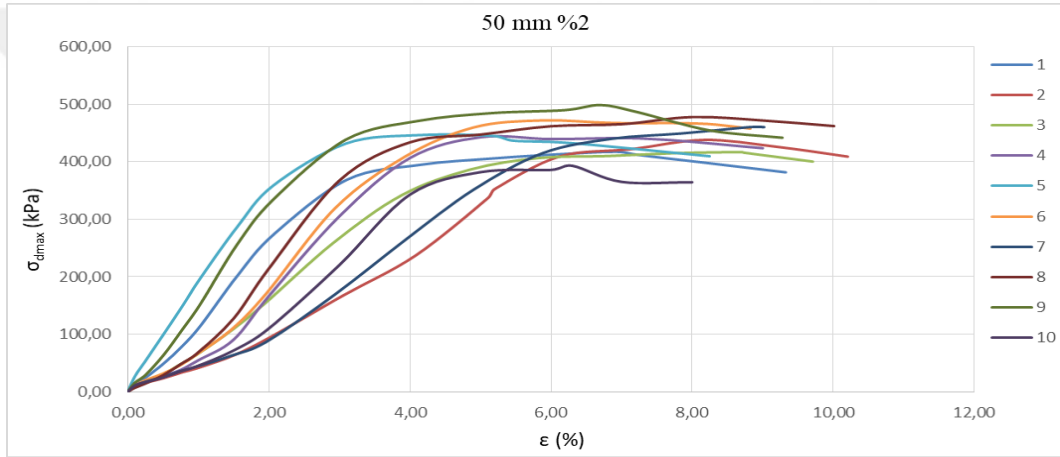
Şekil 5.32. %0,5 oranında 50 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).



Şekil 5.33. %1 oranında 50 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).



Şekil 5.34. %1,5 oranında 50 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).

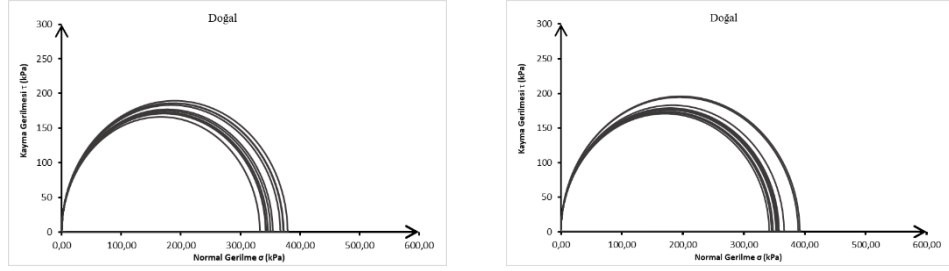


Şekil 5.35. %2 oranında 50 mm fiber katkılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Çap: 5,0 cm).

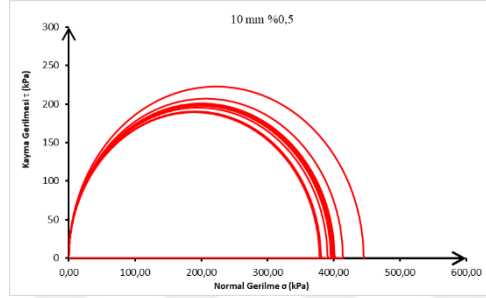
Fiber oranının özellikle %1,5 oranına yükseltilmesiyle fiber boyunun fazla bir etkisi olmaksızın kalıcı direnç değerlerinin daha düşük fiber katkılı numunelere göre aşırı düşüşler göstermediği anlaşılmaktadır. Fiber oranı %2'ye çıkınca artan deformasyonlarla numune dayanımlarının neredeyse değişmeden sabit bir değerle devam ettiği görülmektedir. Bu da fiberlerin numunelere süneklik kazandırdığını göstermektedir.

5.3.2. Serbest basma deneyi ile elde edilen Mohr Çemberleri

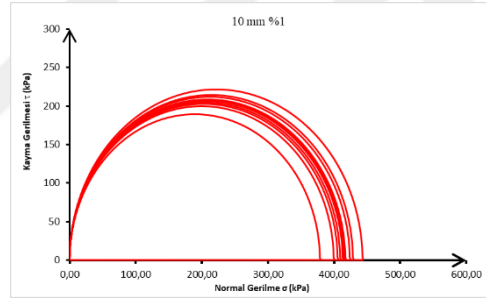
Optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler üzerinde yapılan serbest basma deneylerinden elde edilen Mohr çemberleri Şekil 5.36. ile Şekil 5.65. arasında gösterilmektedir.



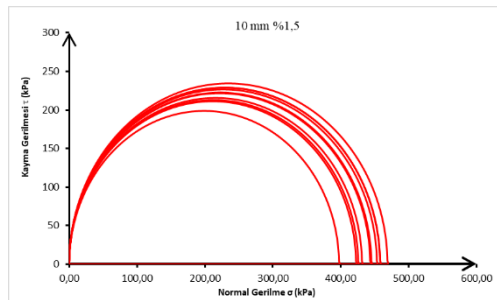
Şekil 5.36. 3,5 cm (sol) ve 5,0 cm (sağ) çaplı doğal zemin numunelerinde Mohr çemberleri.



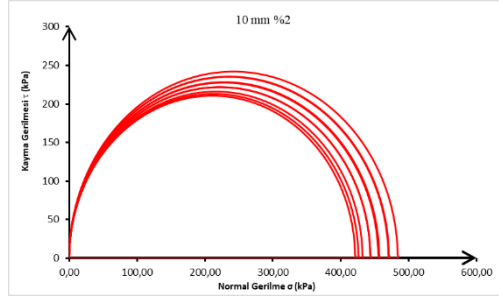
Şekil 5.37. %0,5 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 3,5 cm).



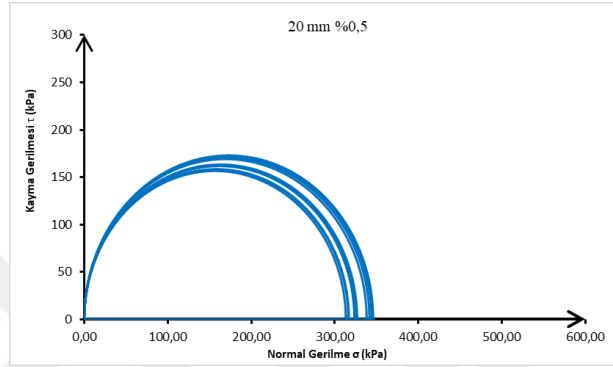
Şekil 5.38. %1 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 3,5 cm).



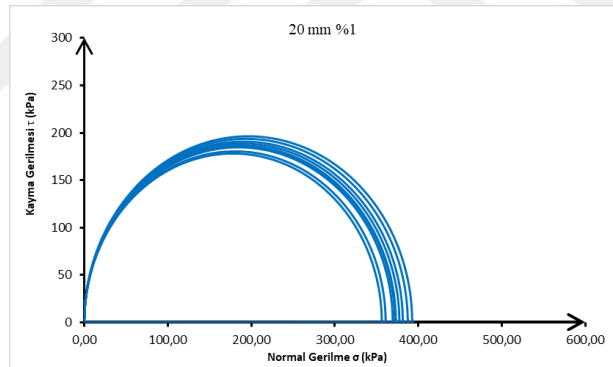
Şekil 5.39. %1,5 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 3,5 cm).



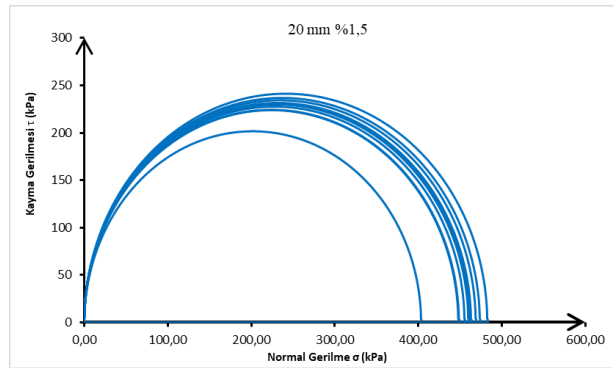
Şekil 5.40. %2 oranında 10 mm fiber katkı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 3,5 cm).



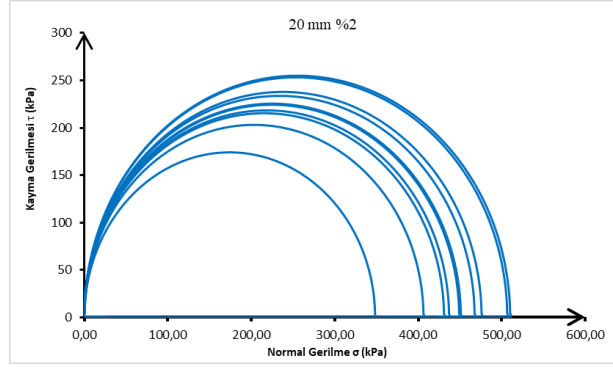
Şekil 5.41. %0,5 oranında 20 mm fiber katkı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 3,5 cm).



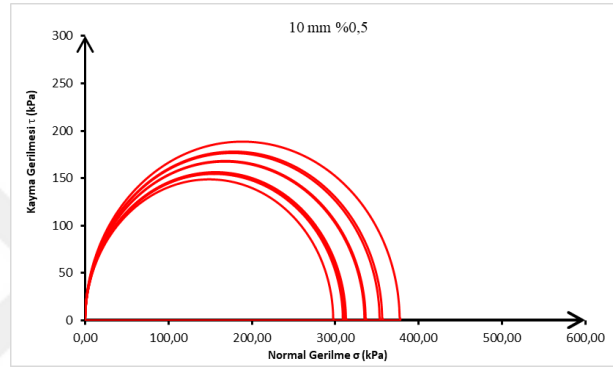
Şekil 5.42. %1 oranında 20 mm fiber katkı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 3,5 cm).



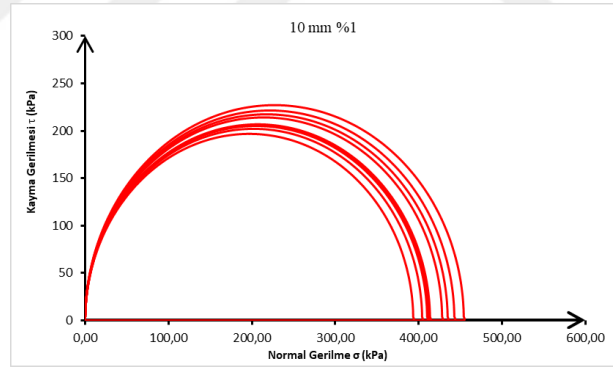
Şekil 5.43. %1,5 oranında 20 mm fiber katkı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 3,5 cm).



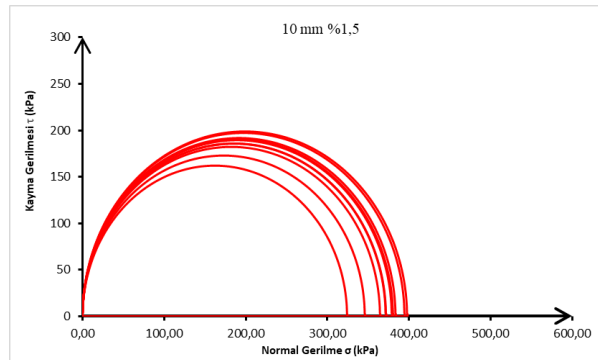
Şekil 5.44. %2 oranında 20 mm fiber katkı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 3,5 cm).



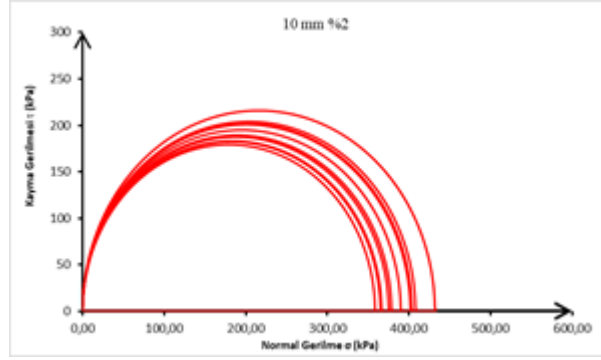
Şekil 5.45. %0,5 oranında 10 mm fiber katkı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).



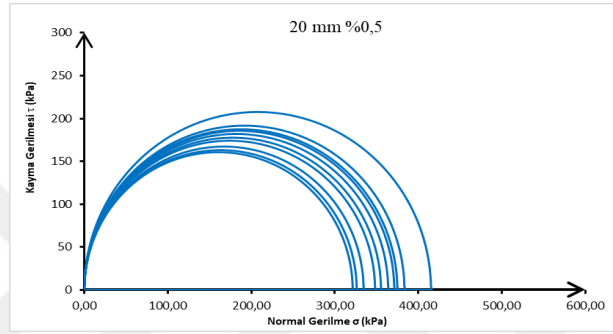
Şekil 5.46. %1 oranında 10 mm fiber katkı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).



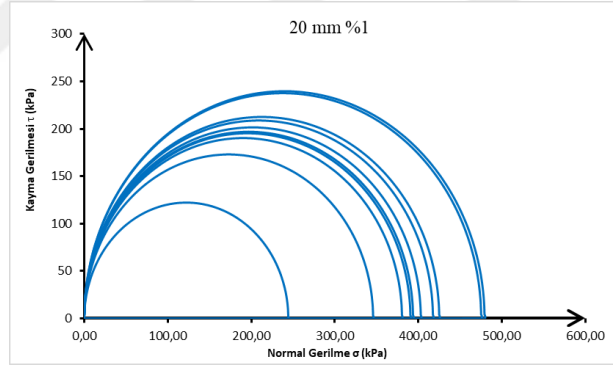
Şekil 5.47. %1,5 oranında 10 mm fiber katkı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).



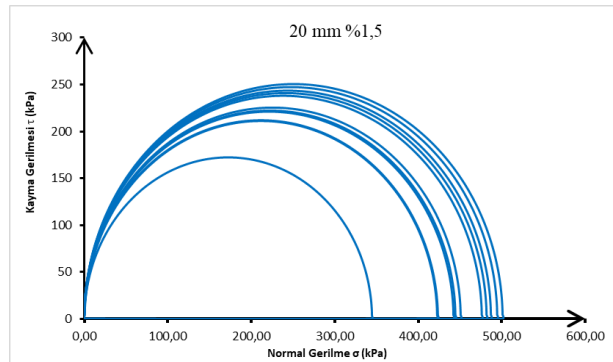
Şekil 5.48. %2 oranında 10 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).



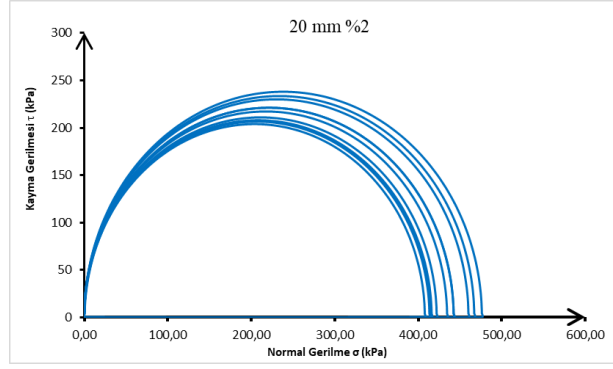
Şekil 5.49. %0,5 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).



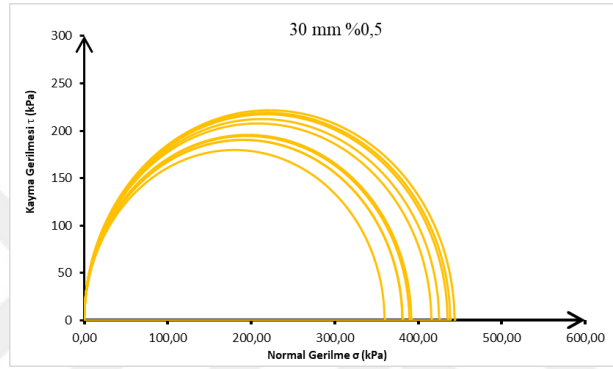
Şekil 5.50. %1 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).



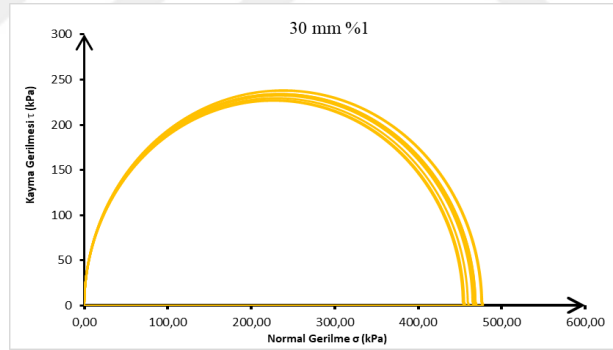
Şekil 5.51. %1,5 oranında 20 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).



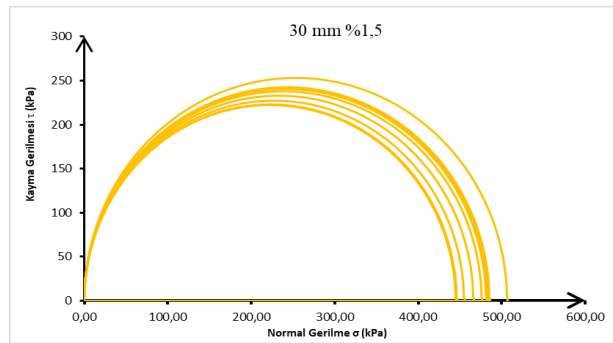
Şekil 5.52. %2 oranında 20 mm fiber katkı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).



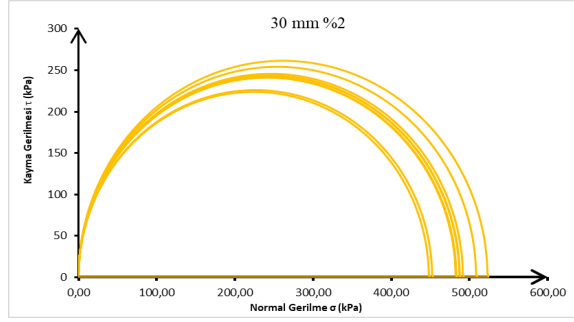
Şekil 5.53. %0,5 oranında 30 mm fiber katkı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).



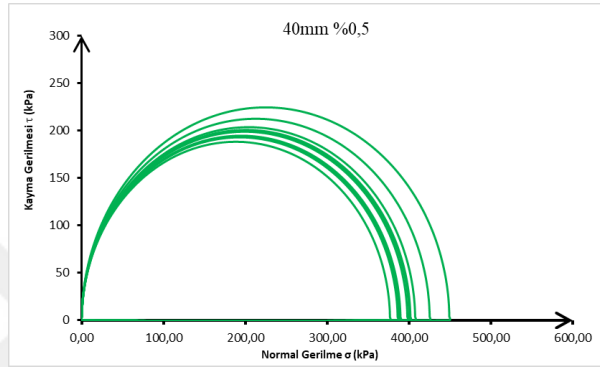
Şekil 5.54. %1 oranında 30 mm fiber katkı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).



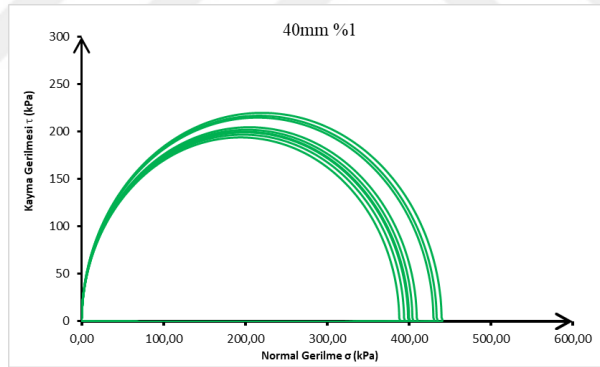
Şekil 5.55. %1,5 oranında 30 mm fiber katkı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).



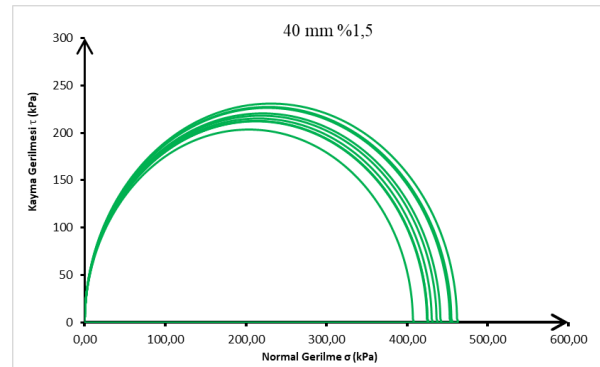
Şekil 5.56. %2 oranında 30 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).



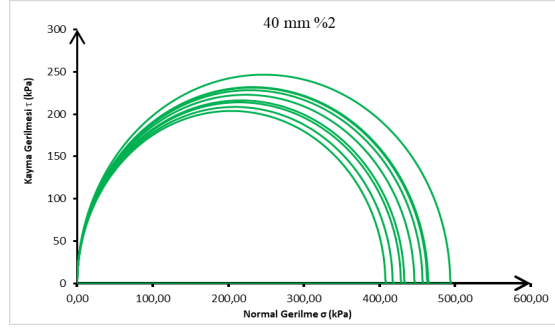
Şekil 5.57. %0,5 oranında 40 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).



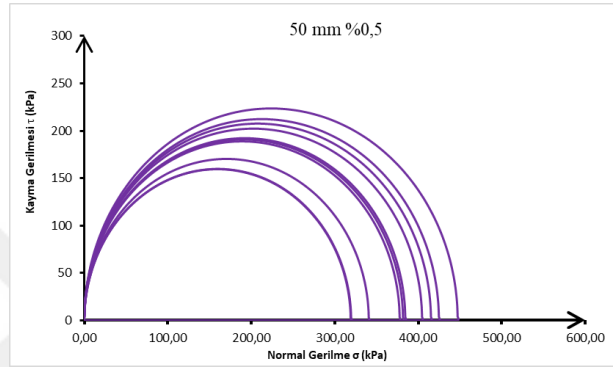
Şekil 5.58. %1 oranında 40 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).



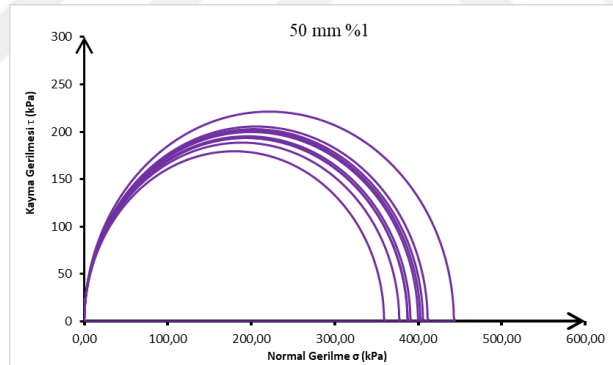
Şekil 5.59. %1,5 oranında 40 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).



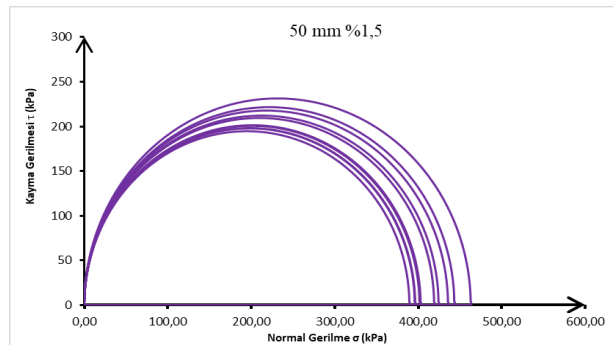
Şekil 5.60. %2 oranında 40 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).



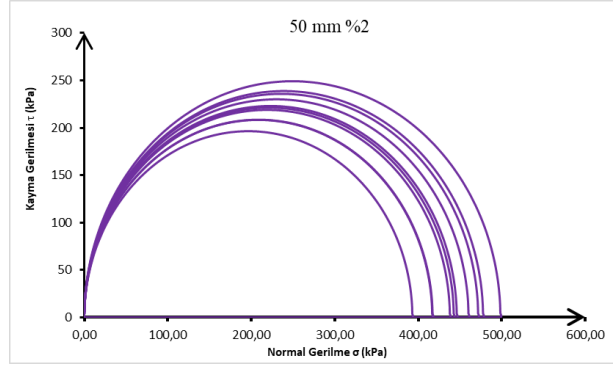
Şekil 5.61. %0,5 oranında 50 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).



Şekil 5.62. %1 oranında 50 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).

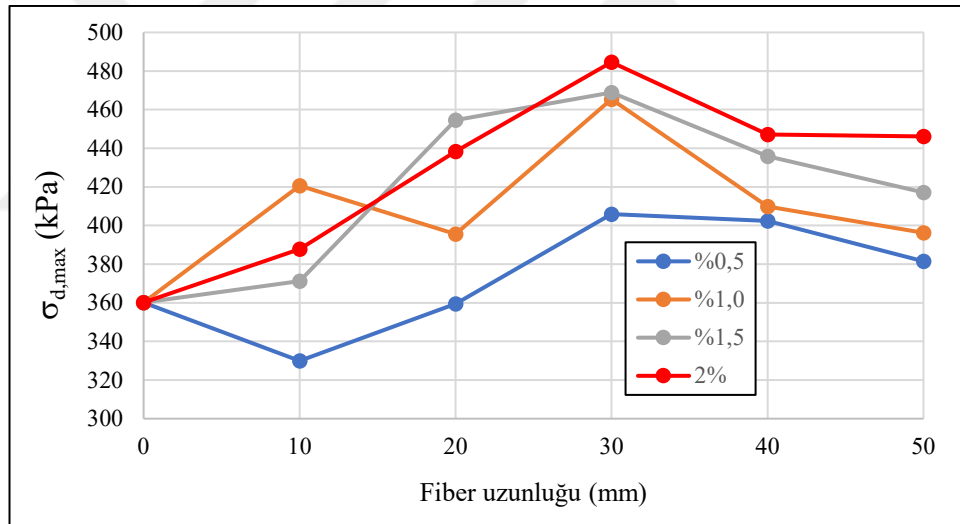


Şekil 5.63. %1,5 oranında 50 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).



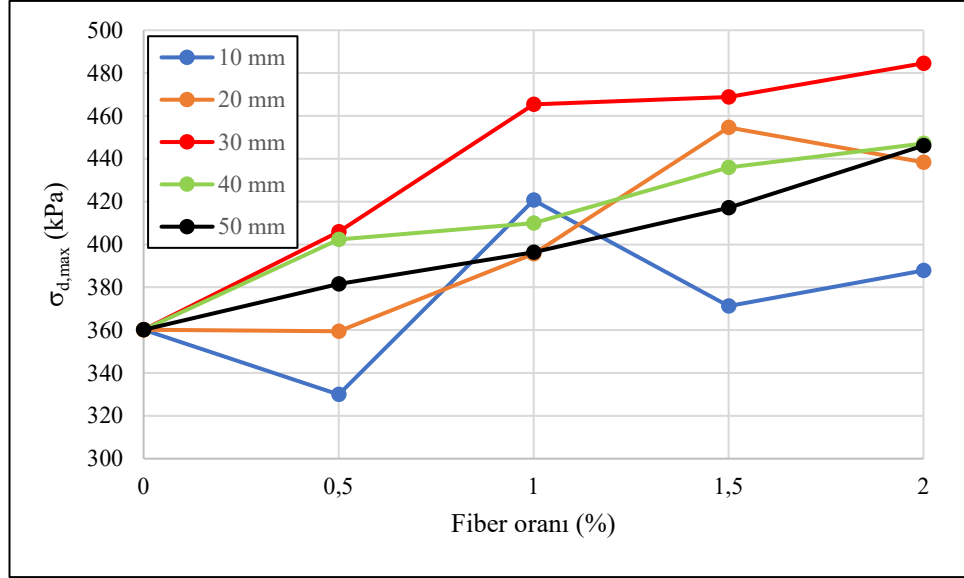
Şekil 5.64. %2 oranında 50 mm fiber katkılı numunelerin Mohr çemberleri (Çap: 5,0 cm).

Şekil 5.65.'de serbest basma deneylerinde elde edilen dayanımlar fiber uzunluğuna bağlı olarak gösterilmektedir. Burada da öncelikle 30 mm fiber uzunluğuna kadar dayanımların arttığı, yükselen fiber boylarında ise dayanım artışının azalma eğiliminde olduğu görülmektedir.



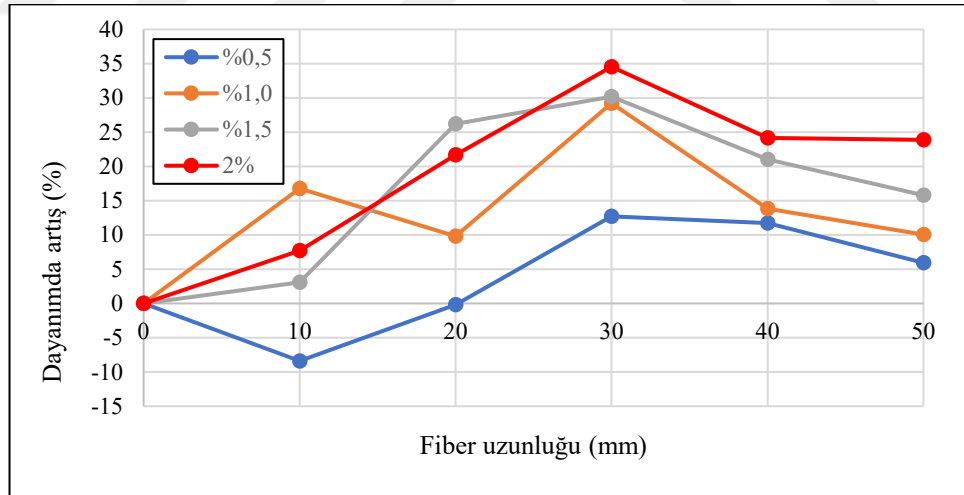
Şekil 5.65. Dayanım - fiber uzunluğu ilişkisi.

Şekil 5.66.'da serbest basma deneylerinde elde edilen dayanımlar fiber oranına bağlı olarak gösterilmektedir. Burada da benzer şekilde 30 mm boylu fiber katkılı zeminlerde en yüksek dayanıma ulaşıldığı görülmektedir.



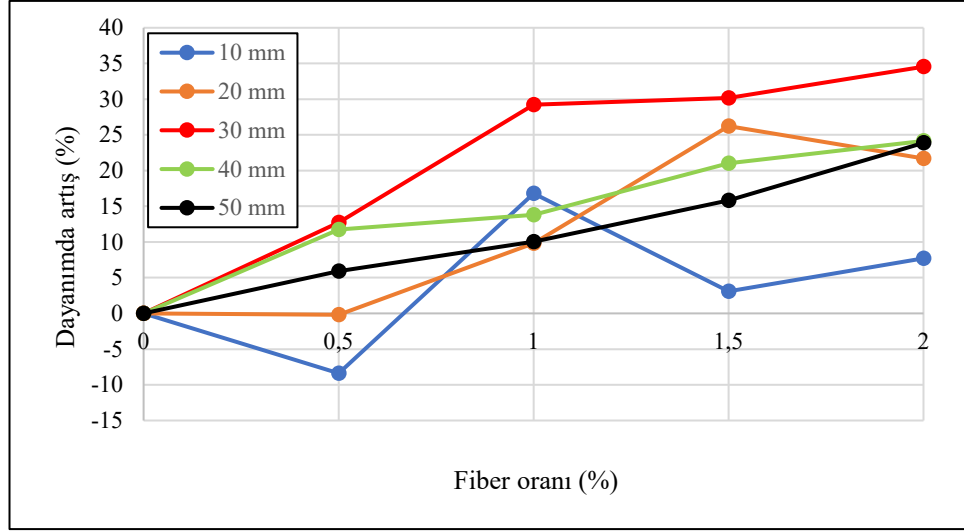
Şekil 5.66. Dayanım - fiber oranı ilişkisi.

Şekil 5.67. ve Şekil 5.68.'de dayanım artış oranları fiber boyu ve fiber oranına göre gösterilmektedir. Şekil 5.67.'de 30 mm boylu fiberlerin %2 oranında kullanılması durumunda dayanım artışlarının %35'lere varabildiği görülmektedir.



Şekil 5.67. Dayanım artışı - fiber uzunluğu ilişkisi.

Şekil 5.68.'de en yüksek dayanım artışlarının çoğunlukla %2 oranında fiber kullanılması durumunda ortaya çıktığı görülmektedir.



Şekil 5.68. Dayanım artışı - fiber oranı ilişkisi.

BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tez çalışmasında 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm ve 50 mm uzunluğundaki KraTos Makro yüksek dirençli polipropilen fiber Kocaeli ilinden temin edilen kil zemine ağırlıkça %0,5 - 1 - 1,5 - 2 oranlarında eklenerek iki farklı çap ve yükseklikte silindirik numuneler hazırlanmıştır. Silindirik numunelerden birisi 3,50 cm çap ve 7,00 cm yüksekliğe, diğeri ise 5,00 cm çap ve 10,00 cm yüksekliğe sahiptir. Silindirik numuneler standart olarak kullanılan kompaksiyon kalıbı ile hazırlanmamış, özel sıkıştırma kalıpları kullanılarak hazırlanmıştır. 3,50 cm çap ve 7,00 cm yüksekliğinde 90 adet numune serbest basma deneyine tabi tutulmuştur. Bunlardan 10 tanesi doğal kil, 80 tanesi ise 10 mm ve 20 mm uzunluğundaki fiberlerle güçlendirilmiş numunelerdir. 5,00 cm çap, 10,00 cm yüksekliğinde olan 210 adet numune deneye tabi tutulmuştur. Bunlardan 10 tanesi doğal kil, 200 tanesi ise, 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm ve 50 mm uzunluğundaki fiberlerle güçlendirilmiş numunelerdir. Böylece 20 tanesi doğal, 280 tanesi polipropilen fiber katkılı numuneler olmak üzere toplamda 300 numune üzerinde serbest basmayı deneyi yapılmıştır. Polipropilen fiber farklı boy ve oranlarda eklenerek kil zeminin kayma direncini arttırdığı gözlemlenmiştir.

İlk olarak sıkıştırma özelliklerinin bulunması amacıyla 1800 gr'lık kil zemin numunelerine 50 ml - 100 ml - 150 ml - 200 ml - 250 ml - 300 ml ve 350 ml su eklenerek hazırlanan numuneler üzerinde standart Proktor deneyi yapılmış ve optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık bulunmuştur. İkinci aşamada optimum su muhtevasında hazırlanan doğal zemine 10 mm - 20 mm - 30 mm - 40 mm ve 50 mm uzunluklarında polipropilen fiberler, %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranlarında eklenerek sıkıştırma kalıbında sabit enerji ile sıkıştırılarak numuneler hazırlanmış ve bunlar üzerinde serbest basma deneyi yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile kil zeminin ve polipropilen fiberin mikroskobik yapısı incelenmiştir. Polipropilen yüzeyindeki aderans arttırıcı boşluklu yapı dikkat çekmiştir.

Tez çalışmasının özeti şu şekilde sıralanabilir:

Artan fiber oranıyla birlikte birim hacim ağırlıkları ve doygunluk dereceleri düşmüş, boşluk oranları ise artmıştır. Fiberin zemine oranla birim hacim ağırlığının düşük olması bu duruma sebep olmuştur.

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile polipropilen fiberin mikroskobik yapısı (x50, x500, x1000 ve x2000) ortaya konmuş ve fiberde imalat sırasında oluşturulmuş pürüzlerin varlığının kenetlenmenin bariz bir şekilde sağlanacağını göstergesi olduğu sonucuna varılmıştır.

Optimum su muhtevasında hazırlanan numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafikleri incelendiğinde 3,5 cm çaplı doğal numunede serbest basma dayanımına %5 civarında deformasyonda ulaşıldığı görülmektedir. Fiberle güçlendirilmiş numunelerde ise fiber oranı arttıkça kırılma anındaki boy değişim oranının %4'e doğru çekildiği görülmektedir. Aynı zamanda numunede maksimum direnç aşıldıktan sonra fiber - zemin kenetlenmesi sayesinde direnç azalımının yavaşladığı da ortaya çıkmaktadır. Bu etkinin 20 mm boylu fiber katkılı numunelerde daha belirgin olduğu görülmektedir. Fiber - zemin temas alanının artması sayesinde bu durumun gerçekleştiği söylenebilir.

Kısa boylu fiberlerin zemin içinde daha rahat yerleşmesi ve yönelimlerin daha kolay olmasının sonuçların birbirine yakın çıkmasını sağladığı söylenebilir. Fiber boyu uzadıkça ve oranı arttıkça fiberlerin numune içinde homojen dağılım ve yerleşim problemi ortaya çıkmakta ve sonuçlar birbirinden uzaklaşabilmektedir.

5,0 cm çaplı numunelerde 10 mm ve 20 mm boyundaki fiberlere ek olarak 30 mm - 40 mm ve 50 mm boylu fiberleri kullanmak mümkün olmuştur. Ancak burada özellikle 50 mm boylu fiberlerde numune içinde homojen dağılımı sağlamak zorlaşmış ve bazı fiberlerin numune dışına uzandığı görülmüştür. Bu da numune boyutlarının sonuçları etkilediğini göstermektedir.

3,5 cm çaplı numunelere benzer şekilde 5,0 cm çaplı doğal numunelerde de maksimum dayanıma %5 - %6 civarında ulaşıldığı görülmektedir. Fiber oranı arttıkça fiber boyu farketmeksizin kırılmadaki deformasyon oranının arttığı görülmüş, aynı zamanda numune yenildikten sonraki dayanım düşüşü neredeyse ortadan kalkmıştır. Fiber - zemin etkileşiminin devam etmesi numunelerin davranışını gevrek kırılmadan sünek kırılmaya doğru değiştirmiştir.

En yüksek dayanım 30 mm boylu fiber katkılı numunelerde görülmektedir. Fiber boyu arttıkça fiber - zemin temas alanı artmakta, bu da olumlu yönde etki ederek dayanımın artmasını sağlamaktadır. Ancak artan fiber boyu ile fiberlerin numune içinde homojen dağılımı zorlaşmakta ve fiberlerin yönelimi homojen olmaktan çıkarak öbeklenme durumuna geçmektedir. Bu da 40 mm ve 50 mm boylu fiber katkılı numunelerde dayanımda düşüşe neden olmaktadır.

10 mm ve 20 mm uzunluğundaki polipropilen fiberlerin eklenerek hazırlandığı 3,50 cm çapa, 7,00 cm yüksekliğe sahip numuneler üzerinde yapılan serbest basma deneyi sonucunda dayanımda en fazla artış 20 mm uzunluğundaki polipropilen fiberin %1,5 oranında kullanıldığı numunelerde olmuştur. Doğal kil numunede 355,65 kPa olan dayanım %28,35 oranında bir artışla 462,37 kPa'a yükselmiştir. 10 mm ve 20 mm uzunluklarındaki fiberlerin %2 oranında kullanıldığı durumlarda elde edilen %26,64 ve %26,05 dayanım artış değerleri de diğer en yüksek artışlar olmuştur.

5,00 cm çap, 10,00 cm yüksekliğe sahip numuneler üzerinde yapılan serbest basma deneyleri sonucunda en yüksek dayanımlar fiber oranı farketmeksizin 30 mm uzunluğundaki fiberlerin kullanıldığı örneklerde elde edilmiştir. Doğal numunede elde edilen ortalama dayanım 360,15 kPa iken 30 mm uzunluğundaki fiberlerin %2 oranında kullanıldığı durumda 484,58 kPa olarak elde edilmiştir. Bu da %34,55 oranında bir dayanım artışına karşılık gelmektedir. Diğer en yüksek iki dayanım gene 30 mm uzunluğundaki fiberlerin kullanıldığı durumlarda elde edilmiştir. 30 mm uzunluğundaki fiberlerin %0,5 oranında kullanıldığı durumda %12,71, %1 oranında kullanıldığı durumda %29,23, %1,5 oranında kullanıldığı durumda ise %30,18 gibi dayanım artışları elde edilmiştir.

Bütün deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde KraTos Makro yüksek dirençli polipropilen fiberin zemin iyileştirmesinde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.



KAYNAKLAR

- Akbulut, S., Arasan, S. 2004. Atık Liflerle Güçlendirilmiş Kil Zeminlerin Dinamik Özelliklerinin Araştırılması. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 397- 406.
- Aksoy, H.S., Gör, M. 2011. Kumul Zeminlerin Farklı Malzemeler Kullanılarak Stabilize Edilmesi. 4. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Aral, M. 2006. Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı Bir Optimum Tasarım. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Ayračma, B.B., Teymür, B. 2014. Fiber Katkılı Kumların Geoteknik Özellikleri. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği On Üçüncü Ulusal Kongresi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 593-602.
- Bali, A. Texol – Zemin Mühendisliğinde Yeni Bir Malzeme. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Üçüncü Ulusal Kongresi, 329-339.
- Bilgen, G., Kavak, A. 2011. Düşük Plastisiteli Kilde Katkı Olarak Kireç ve Çelikhane Cürufunun Kullanımı. 4. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Çalik, Y., Akbulut, R.K., Zaimoğlu, A.Ş., Yetimoğlu, T. 2019. Polipropilen Lif ile Rastgele Donatılandırılan Bir CH Kil Zemininin Donma-Çözülme Çevrimlerinde Serbest Basınç Dayanımının Araştırılması. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9(2):911-921.
- Çetin, A.Y. 2011. Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler ile Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Çimen, Ö., Dereli, B., Yıldırım, F., Şefkatlioğlu, Ö.F., Eralp, A. Günaydın, H.İ. 2013. Manisa Kula Yöresi Volkanik Tüfünün Yüksek Plastisiteli Kilin Mühendislik Özelliklerine Etkisi. 5. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.

- Edinçliler, A., Çabalar, A.F. 2009. Atık Lastik-Kum Karışımlarının Mekanik Özelliklerini Etkileyen Faktörler.3. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana, 451-458.
- Gerkuş, H. 2011. Fiber ile Güçlendirilmiş Kum Zeminlerin Dinamik Özellikleri ve Statik Davranışları. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Habib, A. R. R., 2019. Polietilen ve Polipropilen İçeren Plastik Atıklardan Değerli Kimyasalların Üretimi. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Doğal ve Uygulamalı Bilimler Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- İnanır, O. E., Yetimoğlu, T., Sağlamer, A. 1998. Ayrık Liflerle Rastgele Donatılı Kum Zeminlerin Taşıma Kapasitesi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 469-479.
- Karakan, E., Eskişar, T., Altun, S. 2016. Fiber Donatılı Gevşek ve Orta Sıkı Kumların Sıvılaşma Davranışları. Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, 249-256.
- Kenan, A., Özocak, A. 2018. Bazalt Fiber Katkısının Siltli Zeminlerin Kayma Direncine Etkisi. Published in 2nd International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management, Sakarya, 918-924.
- Keskin, E., Turan, B., Arsoy, S. 2009. Isıl İyileştirme ve Kireçle İyileştirmenin Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi. 3. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana, 515-522.
- Kurt Albayrak, Z.N., Altun, B. 2018. Biyopolimer ile Etkileştirilmiş Kil/Mermer Karışımlarının Bazı Geoteknik Özelliklerinin Araştırılması. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 17. Ulusal Kongresi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa & İstanbul Üniversitesi, İstanbul,
- Kurt, G. 2006. Lif İçeriği ve Su/Çimento Oranının Fibrobetonun Mekanik Davranışına Etkileri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Majedi, P., Kurt, Z.Ş., Akbulut, S. 2013. Lateks Katkılı Su Sevmez (Hidrofob) Kilin Bazı Geoteknik Özelliklerinin ve Sönüm Oranlarının İncelenmesi. 5. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Mitchell, J.K. and Katti, R.K. (1981) Soil improvement - State of the art report, Proceedings, 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm (June), pp. 509-565.
- Ndepete, C.P., Sert, S. 2017. Silt Zeminin Drenajsız Kayma Direncinin Bazalt Fiber Katkısı ile Artırılması. 7. Geoteknik Sempozyumu, İstanbul, 437-448.

- Özdemir, T., Polat, G.E., Azdeniz, Ö., Boz, A., Sezer, A. 2016. Bazalt Fiber ve Kireç ile Güçlendirilmiş Kıl Zeminin Dayanım Özellikleri. Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, 1025- 1034.
- Özocak, A., Sert, S., Bol, E. 2013. Siltli Zeminlerde Uçucu Kül Katkısının Mekanik Özelliklere Etkisi. 5. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Soğancı, A.S. 2014. Şişen Zeminlerin Mühendislik Özelliklerine Polipropilen Elyaf Katkısının Etkisi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği On Beşinci Ulusal Kongresi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 725-732.
- Şenol, A, Günaydın, M. 2011. İyi Derecelenmiş Zeminlerin Silis Dumanı ve Fosfojips ile Stabilizasyonu. 4. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana, 1-12.
- Şenol, A., Gümüşer, C. 2009. Uçucu Kül ve Polipropilen Elyafların Zayıf Zeminlerin Kıvam Limitleri, Kompaksiyon ve Serbest Basınç Dayanımına Etkisi. 3. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana, 627-637.
- URL-1 <<http://www.emirli.com.tr/zemin-iyilestirme-yontemleri.html> 19.03.2020
- URL-2<<https://tekstilbilgi.net/etiket/dogal-elyaflar-nelerdir>>Erişim Tarihi:11.09.2020.
- URL-3<<https://www.enerjiportali.com/polipropilen-nedir-nelerlerde-kullanilir/>>, Erişim Tarihi:13.09.2020.
- URL4<www.kordsa.com.tr/Images/pdf/KraTos_Sentetik_Fiber_Donatilar_Teknik_Brosuru.pdf Erişim Tarihi:13.09.2020.
- URL-5<<https://www.kordsa.com.tr/urunler/detay/KraTos-Makro/287/367/0>>, Erişim Tarihi:13.09.2020.
- Utrackı, L.A. And Jamieson, A. M. 2010. Polymer Physics: from suspensions to nanocomposites and beyond, Hoboken, NJ, USA.
- Yılmaz, Y., Sevcen, Ü. 2010. Polipropilen Fiber ve Uçucu Kül Katkılı Ankara Kilinin Bazı Geoteknik Özelliklerinin Araştırılması. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği On Üçüncü Ulusal Kongresi, İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul, 133- 142.
- Zaimoğlu, A.Ş. 2011. İnce Daneli Zeminlerde Polipropilen Fiber ve Katkı Malzemelerinin Serbest Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkileri. 4. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Zaimoğlu, A.Ş., Hattatoğlu, F., Hınıslioğlu, S. 2009. Atık Malzemeler ile Stabilize Edilmiş Temel Tabakasının Serbest Basınç Dayanımının Optimizasyonu. 3. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana, 431-437.

- Zaimoğlu, A.Ş., Tan, Ö., Güngörmüş, G. 2007. Bentonit, Uçucu Kül ve Silis Dumanı Katkılı Çimento Enjeksiyonlarının Taneli Zeminlerin Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Üzerindeki Etkileri. 2. Geoteknik Sempozyumu, Mersin, 453-465.
- Zaimoğlu, Ş. 2010. Polipropilen Fiber ve Katkı Malzemeleri ile İyileştirilmiş İnce Daneli Zeminlerde Serbest Basınç Dayanımının Optimizasyonu. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği On Üçüncü Ulusal Kongresi, İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul, 321-326.



ÖZGEÇMİŞ

Fatih Küçük, 2013 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü 3.5 yılda bölüm üçüncüsü olarak bitirdi. 2017 yılında Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı.

