T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BAZALT FİBER VE ÇİMENTO KATKISININ ZAYIF ZEMİNLERİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

UĞUR MAHİR TÜRKEL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. ALİ ATEŞ

DÜZCE, 2019

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BAZALT FİBER VE ÇİMENTO KATKISININ ZAYIF ZEMİNLERİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Uğur Mahir TÜRKEL tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Ali ATEŞ

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Ali ATEŞ
Düzce Üniversitesi _____

Prof. Dr. Şeref KESKİN
Düzce Üniversitesi _____

Doç. Dr. İnan KESKİN
Karabük Üniversitesi _____

Tez Savunma Tarihi: 24/01/2019

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

24 Ocak 2019

Uğur Mahir TÜRKEL

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı danışman hocam Doç. Dr. Ali ATEŞ'e en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen, tanımış olmaktan mutluluk duyduğum sevgili arkadaşlarım Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DAYI ve Öğr. Gör. Dr. Bayram POYRAZ'a şükranlarımı sunarım. Değerli Bölüm öğretim üyelerimiz ve Bölüm teknikerimiz Bülent ÖZSARIKAMIŞ'a desteklerinden ötürü teşekkürü bir borç bilirim.

Gösterdiği özverili çalışmayla bu teze katkı sunan, sevgisini ve desteğini her zaman hissettiğim sevgili kardeşim Pınar TÜRKEL'e ve hayatıma girdiği andan itibaren varlığıyla yaşamımı güzelleştirerek anlamlı kılan sevgili Özlem ANAKAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yaşamım boyunca hep yanımda olan, sevgi ve desteklerini esirgemeyen sevgili babam Fethi TÜRKEL, annem Müşerref TÜRKEL ve ablam Yeşim Deniz TÜRKEL'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

24 Ocak 2019 **Uğur Mahir TÜRKEL**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ ..... **vii**

ÇİZELGE LİSTESİ ..... **x**

KISALTMALAR ..... **xi**

SİMGELER ..... **xii**

ÖZET ..... **xiii**

ABSTRACT ..... **xiv**

1. GİRİŞ **1**

1.1. SIVILAŞMA **3**

1.1.1. Sıvılaşma Türleri **4**

1.1.2. Sıvılaşma Potansiyeli Olan Zemin Türleri **4**

1.1.3. Sıvılaşmaya Karşı Alınabilecek Tedbirler **6**

1.2. ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ **7**

1.2.1. Sıkılaştırma Yöntemleri **8**

1.2.1.1. *Vibro Teknikleri* *9*

1.2.1.2. *Dinamik Kompaksiyon* *11*

1.2.1.3. *Patlatma* *12*

1.2.1.4. *Kompaksiyon Enjeksiyonu* *12*

1.2.1.5. *Ön Yükleme* *13*

1.2.2. Güçlendirme Yöntemleri **14**

1.2.2.1. *Taş Kolonlar* *14*

1.2.2.2. *Kompaksiyon Kazıkları* *15*

1.2.3. Karıştırma ve Enjeksiyon Yöntemleri **16**

1.2.3.1. *Derin Zemin Karıştırma* *16*

1.2.3.2. *Jet-Grout (Jet Enjeksiyonu)* *17*

1.2.3.3. *Permeasyon (Gözenek) Enjeksiyonu* *18*

1.2.3.4. *Çatlatma Enjeksiyonu* *19*

1.2.4. Drenaj **20**

1.2.5. Zemin Dondurma Yöntemi 21
1.2.6. Geosentetik Kullanımı 21
1.2.7. Katkı Malzemeleriyle Zemin İyileştirme 21
2. LİTERATÜR ÖZETİ 23
3. MATERYAL VE YÖNTEM 29
3.1. MATERYAL 29
3.1.1. Kum Zemin 29
3.1.2. Çimento 30
3.1.3. Bazalt Fiber 31
3.1.4. Su 32
3.2. YÖNTEM 32
3.2.1. Kompaksiyon Deneyi 34
3.2.2. CBR Deneyi 36
3.2.3. Kesme Kutusu Deneyi 38
3.2.4. Serbest Basınç Deneyi 40
4. BULGULAR 43
4.1. KOMPAKSİYON DENEYİ SONUÇLARI 43
4.2. CBR DENEYİ SONUÇLARI 48
4.3. KESME KUTUSU DENEYİ SONUÇLARI 52
4.4. SERBEST BASINÇ DENEYİ SONUÇLARI 77
5. TARTIŞMA 87
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 88
7. KAYNAKLAR 91
ÖZGEÇMİŞ 95

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Çin kriterlerine göre sıvılaşma koşulları. 5
Şekil 1.2. Zemin iyileştirmesinde uygulanabilecek yöntemler. 8
Şekil 1.3. Vibroflotasyon a) Vince asılı prob (sonda) b) Vibroflotasyon uygulaması. 9
Şekil 1.4. Vibro tij tekniğinin şematik gösterimi. 10
Şekil 1.5. Dinamik kompaksiyon a) Dinamik kompaksiyon uygulaması b) Dinamik kompaksiyon düzeneğinin şematik gösterimi. 11
Şekil 1.6. Mevcut bir tekil temele kompaksiyon enjeksiyonu uygulanması. 13
Şekil 1.7. Taş kolon imalat aşamaları. 14
Şekil 1.8. Kompaksiyon kazık uygulaması ve prekast çakma kazıklar. 15
Şekil 1.9. Derin karıştırma düzeneği ve uygulamasının şematik gösterimi. 17
Şekil 1.10. Jet-grout uygulama aşamaları. 18
Şekil 1.11. Permeasyon enjeksiyonunun şematik gösterimi. 19
Şekil 1.12. Çatlatma enjeksiyonu. 19
Şekil 1.13. Çakıl dren uygulaması. 20
Şekil 3.1. Dane çapı dağılım eğrisi ve sıvılaşma sınır eğrileri. 29
Şekil 3.2. Kum zemin. 30
Şekil 3.3. CEM I 42,5 R Portland çimentosu. 30
Şekil 3.4. Bazalt lif formları a) Sürekli bazalt fiber b) Bazalt lif c) Kırpılmış bazalt fiber. 32
Şekil 3.5. Kompaksiyon deneyi için hazırlanmış karışım ve Proktor kalıbı. 35
Şekil 3.6. Kompaksiyon cihazı ve sıkıştırma işlemi. 35
Şekil 3.7. Numunenin üst yüzeyinin spatula yardımıyla düzlenmesi ve etüve bırakılmak için alınan örnekler. 35
Şekil 3.8. Kür havuzunda bekletilen numuneler. 37
Şekil 3.9. Numunenin CBR deney cihazında test edilmesi. 37
Şekil 3.10. Kesme kutusu deney düzeneğinin şematik gösterimi. 38
Şekil 3.11. Kesme kutusuna ve deney düzeneğine yerleştirilmiş numune. 39
Şekil 3.12. Kesme kutusu deneyinin uygulanması. 40
Şekil 3.13. Basınç deneyi numuneleri. 41
Şekil 3.14. Basınç dayanımını ölçmede kullanılan deney düzeneği. 41
Şekil 3.15. Numunelerin serbest basınç deneyi sonrası görünümü. 42
Şekil 4.1. %0 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kompaksiyon grafiği. 44
Şekil 4.2. %2,5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kompaksiyon grafiği. 45
Şekil 4.3. %5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kompaksiyon grafiği. 46
Şekil 4.4. %10 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kompaksiyon grafiği. 47
Şekil 4.5. %0 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin yük-penetrasyon grafiği. 48
Şekil 4.6. %2,5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin yük-

penetrasyon grafiği. 49
Şekil 4.7. %5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin yük-penetrasyon grafiği. 50
Şekil 4.8. %10 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin yük-penetrasyon grafiği. 51
Şekil 4.9. Tüm serilerin CBR deney sonuçlarının karşılaştırmalı grafiği. 52
Şekil 4.10. Katkısız numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği. 54
Şekil 4.11. Katkısız numunenin kırılma zarfı. 54
Şekil 4.12. %0 çimento ve %1 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği. 55
Şekil 4.13. %0 çimento ve %1 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı. 55
Şekil 4.14. %0 çimento ve %2 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği. 56
Şekil 4.15. %0 çimento ve %2 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı. 56
Şekil 4.16. %0 çimento ve %3 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği. 57
Şekil 4.17. %0 çimento ve %3 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı. 57
Şekil 4.18. %0 çimento ve %4 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği. 58
Şekil 4.19. %0 çimento ve %4 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı. 58
Şekil 4.20. %2,5 çimento ve %0 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği. 60
Şekil 4.21. %2,5 çimento ve %0 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı. 60
Şekil 4.22. %2,5 çimento ve %1 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği. 61
Şekil 4.23. %2,5 çimento ve %1 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı. 61
Şekil 4.24. %2,5 çimento ve %2 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği. 62
Şekil 4.25. %2,5 çimento ve %2 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı. 62
Şekil 4.26. %2,5 çimento ve %3 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği. 63
Şekil 4.27. %2,5 çimento ve %3 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı. 63
Şekil 4.28. %2,5 çimento ve %4 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği. 64
Şekil 4.29. %2,5 çimento ve %4 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı. 64
Şekil 4.30. %5 çimento ve %0 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği. 66
Şekil 4.31. %5 çimento ve %0 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı. 66
Şekil 4.32. %5 çimento ve %1 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği. 67
Şekil 4.33. %5 çimento ve %1 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı. 67
Şekil 4.34. %5 çimento ve %2 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği. 68
Şekil 4.35. %5 çimento ve %2 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı. 68
Şekil 4.36. %5 çimento ve %3 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği. 69
Şekil 4.37. %5 çimento ve %3 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı. 69
Şekil 4.38. %5 çimento ve %4 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği. 70
Şekil 4.39. %5 çimento ve %4 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı. 70

Şekil 4.40. %10 çimento ve %0 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği. 72
Şekil 4.41. %10 çimento ve %0 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı. 72
Şekil 4.42. %10 çimento ve %1 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği. 73
Şekil 4.43. %10 çimento ve %1 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı. 73
Şekil 4.44. %10 çimento ve %2 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği. 74
Şekil 4.45. %10 çimento ve %2 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı. 74
Şekil 4.46. %10 çimento ve %3 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği. 75
Şekil 4.47. %10 çimento ve %3 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı. 75
Şekil 4.48. %10 çimento ve %4 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği. 76
Şekil 4.49. %10 çimento ve %4 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı. 76
Şekil 4.50. %0 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin ortalama basınç dayanımları. 78
Şekil 4.51. Katkısız numunenin gerilme-deformasyon grafiği (28 gün). 79
Şekil 4.52. %0 çimento ve %4 fiber katkılı numunenin gerilme-deformasyon grafiği (28 gün). 79
Şekil 4.53. %2,5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin ortalama basınç dayanımları. 80
Şekil 4.54. %2,5 çimento ve %0 fiber katkılı numunenin gerilme-deformasyon grafiği (28 gün). 81
Şekil 4.55. %2,5 çimento ve %4 fiber katkılı numunenin gerilme-deformasyon grafiği (28 gün). 81
Şekil 4.56. %5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin ortalama basınç dayanımları. 82
Şekil 4.57. %5 çimento ve %0 fiber katkılı numunenin gerilme-deformasyon grafiği (28 gün). 83
Şekil 4.58. %5 çimento ve %4 fiber katkılı numunenin gerilme-deformasyon grafiği (28 gün). 83
Şekil 4.59. %10 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin ortalama basınç dayanımları. 84
Şekil 4.60. %10 çimento ve %0 fiber katkılı numunenin gerilme-deformasyon grafiği (28 gün). 85
Şekil 4.61. %10 çimento ve %4 fiber katkılı numunenin gerilme-deformasyon grafiği (28 gün). 85
Şekil 4.62. Tüm serilerin 14 günlük serbest basınç dayanımı. 86
Şekil 4.63. Tüm serilerin 28 günlük serbest basınç dayanımı. 86

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 1.1. Değiştirilmiş Çin kriterleri..... 6
Çizelge 1.2. Zemin sıvılaşmasına karşı uygulanabilecek iyileştirme yöntemleri..... 7
Çizelge 3.1. Kum zemine ait fiziksel özellikler ve zemin sınıfı..... 30
Çizelge 3.2. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik analizi..... 31
Çizelge 3.3. Bazaltın kimyasal bileşenleri..... 31
Çizelge 3.4. Bazalt fiberin mekanik ve fiziksel özellikleri..... 32
Çizelge 3.5. Numune serileri ve serilerdeki malzemelerin karışım oranları..... 33
Çizelge 3.6. CBR hesaplarında kullanılan standart gerilmeler ve standart yükler..... 37
Çizelge 4.1. %0 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kompaksiyon deneyi sonuçları..... 43
Çizelge 4.2. %2,5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kompaksiyon deneyi sonuçları..... 44
Çizelge 4.3. %5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kompaksiyon deneyi sonuçları..... 45
Çizelge 4.4. %10 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kompaksiyon deneyi sonuçları..... 46
Çizelge 4.5. %0 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin CBR deneyi sonuçları..... 48
Çizelge 4.6. %2,5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin CBR deneyi sonuçları..... 49
Çizelge 4.7. %5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin CBR deneyi sonuçları..... 50
Çizelge 4.8. %10 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin CBR deneyi sonuçları..... 51
Çizelge 4.9. %0 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kesme kutusu deney sonuçları..... 53
Çizelge 4.10. %2,5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kesme kutusu deney sonuçları..... 59
Çizelge 4.11. %5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kesme kutusu deney sonuçları..... 65
Çizelge 4.12. %10 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kesme kutusu deney sonuçları..... 71
Çizelge 4.13. Numunelerin birim hacim ağırlığı ve su muhtevası değerleri..... 77

KISALTMALAR

ASCE	Amerikan İnşaat Mühendisleri Birliği
CBR	Kaliforniya Taşıma Oranı

SİMGELER

c	Kohezyon
D_r	Rölatif sıkılık
e	Boşluk oranı
e_{min}	Minimum boşluk oranı
e_{mak}	Maksimum boşluk oranı
GPa	Gigapascal
G_s	Özgül ağırlık
kN	Kilonewton
kPa	Kilopascal
LL	Likit limit
MPa	Megapascal
M_s	Deprem yüzey dalgası büyüklüğü
M_w	Deprem moment büyüklüğü
N	Newton
P_{mak}	Kırılma yükü
w_n	Doğal su muhtevası
w_{opt}	Optimum su muhtevası
γ	Birim hacim ağırlığı
σ	Basınç dayanımı
σ_n	Normal gerilme
τ	Kayma gerilmesi
μm	Mikron
ϕ	İçsel sürtünme açısı

ÖZET

BAZALT FİBER VE ÇİMENTO KATKISININ ZAYIF ZEMİNLERİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Uğur Mahir TÜRKEL
Düzce Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Doç. Dr. Ali ATEŞ
Ocak 2019, 94 sayfa

Zemin iyileştirmesi, derin temel uygulamalarına kıyasla daha ekonomik olması ve ileri teknolojiye fazla ihtiyaç duymaması açısından zayıf zeminlerin güçlendirilmesinde uygun bir yöntem olabilmektedir. Zemin stabilizasyonunda, zeminin daha sıkı bir duruma gelmesi, taşıma gücünün ve kayma direncinin artırılmasının yanı sıra sıvılaşma riskinin ortadan kaldırılması hedeflenmektedir. Bu bağlamda, zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesinde katkı malzemelerinin kullanımı mühendislik uygulamalarında sıklıkla yer bulmaktadır. Zemin iyileştirmede katkı malzemesi olarak genellikle çimento kullanılmakla birlikte farklı katkı malzemelerinin kullanılabilirliğine yönelik bilimsel araştırmalar devam etmektedir. Bu katkı malzemelerine verilebilecek örneklerden biri de doğal fiberler sınıfına giren, yüksek çekme dayanımına sahip bazalt liflerdir. Yerkabuğunda yaygın olarak bulunan bazalt kayaçlardan dolayı ham maddesinin ucuz ve üretim maliyetinin düşük olmasına karşın, çevre dostu bazalt liflerin geoteknik uygulamalarında kullanımına yönelik çalışmalar ancak son birkaç yılda yapılmaya başlanmıştır. Bu tez çalışması kapsamında, sıvılaşma potansiyeli olan doğal kum zeminin fiziksel özellikleri ve zemin sınıfı belirlendikten sonra ağırlıkça %2,5, %5, %10 oranında çimento ve %1, %2, %3, %4 oranında bazalt fiber katkılı kum zemin numuneleri üzerinde kompaksiyon, Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), direkt kesme kutusu ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Bu sayede, bazalt fiber ve çimento katkısının; sıvılaşma potansiyeli olan kum zeminin kayma direnci ve kayma mukavemeti parametreleri, taşıma gücü ve serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde, çimento ve bazalt fiber katkısının, zeminin kayma direncinde, taşıma gücünde ve basınç dayanımında artışa sebep olduğu gözlenmiştir. Kayma direncinin maksimum olduğu numunedeki çimento oranının %10 ve fiber oranının %3 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Basınç dayanımı en yüksek değerine 28 günlük kür süresi sonunda %10 çimento ve %4 fiber katkılı numunede ulaşırken, en yüksek taşıma gücüne sahip numunenin %10 çimento ve %1 fiber katkılı numune olduğu saptanmıştır. Sonuç olarak, statik ve sismik yükler altında mukavemet ve taşıma gücü kaybına uğrayarak ciddi boyutta şekil değiştirmelere maruz kalabilecek sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerin iyileştirilmesinde çimentoyla birlikte kullanılacak bazalt fiberin, zemin iyileştirme uygulamalarında diğer katkı malzemelerine alternatif olarak düşünülebileceği ortaya konmuştur.

Anahtar sözcükler: Bazalt fiber, Çimento, Sıvılaşma, Zemin iyileştirme

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF BASALT FIBER AND CEMENT ADDITIVES ON GEOTECHNICAL PROPERTIES OF WEAK SOILS

Uğur Mahir TÜRKEL
Düzce University
Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Civil Engineering
Master's Thesis
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ali ATEŞ
January 2019, 94 pages

Soil improvement may be a suitable method for strengthening weak soils in terms of being more economical and not requiring advanced technology compared to deep foundation applications. In the soil stabilization, it is aimed to make the soil more dense and to increase the bearing capacity and the shear strength of the soil as well as to eliminate the risk of liquefaction. In this context, the use of additives in improving the geotechnical properties of soils is frequently found in engineering applications. Although cement is generally used as an additive in soil improvement, scientific researches on the availability of different additives are still in progress. One of the examples that can be given to these additives, which can be used in soil improvement, is the basalt fiber which is classified as natural fiber and has high tensile strength. Although the raw material is cheap and the cost of production is low due to the basalt rocks which are commonly found in the earth's crust, the studies on the use of environmentally friendly basalt fibers in geotechnical applications have only begun in the last few years. In this study, after determining the physical properties and the soil class of the natural liquefiable sandy soils; compaction, California Bearing Ratio (CBR), direct shear box and unconfined compression tests have been conducted on the prepared specimens with the proportions of 2,5%, 5%, 10% cement and 1%, 2%, 3%, 4% basalt fiber (by weight of dry soil). When the test results were examined, it was observed that the cement and basalt fiber additive caused an increase in the shear strength, bearing capacity and compressive strength of the sandy soil. It was concluded that the ratio of cement is 10% and fiber ratio is 3% in the specimen with maximum shear strength. While the compressive strength reached to its maximum value at the end of 28 days of curing in the specimen with 10% cement and 4% fiber, it has been determined that the sample having the highest bearing capacity has 10% cement and 1% fiber additive. As a result, it has been revealed that the basalt fiber, to be used with cement, may be considered as an alternative to other additives in soil improvement applications on soils that may be subject to severe deformations by loss of strength and bearing capacity under static and seismic loads.

Keywords: Basalt fiber, Cement, Liquefaction, Soil improvement

1. GİRİŞ

Yirminci yüzyılın ikinci yarısından itibaren süregelen hızlı nüfus artışıyla birlikte kentselleşme de günümüzde büyük oranda artmış ve bunun sonucu olarak stratejik önemi olan birçok projenin (ulaştırma projeleri, kıyı-liman yapıları, altyapı projeleri, su alma yapıları, endüstriyel yapılar) zayıf zeminlere sahip alanlar üzerinde de gerçekleştirilmesinin gerekebileceği durumlar ortaya çıkmıştır.

İnşaat mühendisliğinde, gerçekleştirilecek projeyle ilgili geoteknik problemlerin araştırılması, tüm mühendislik projelerinin adımları olan tasarım, uygulama, kontrol ve işletme aşamalarının güvenli ve başarılı bir şekilde tamamlanabilmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Üzerine inşa edilen yapıda ciddi hasarların oluşmaması için zeminlerin, statik ve tekrarlı yükler altında gerekli dayanıma ve taşıma gücüne sahip olması gerekmektedir. Üstyapı yükleri, hidrostatik kuvvetler, iksa ve istinat yapılarında zeminin kendi ağırlığından dolayı oluşan yanal yükler zemine etkiyen statik yükleri oluştururken; trafik yükleri, endüstriyel tesislerdeki makine titreşimleri, dalga yükleri ve en büyük öneme sahip deprem yükleri ise zemine etkiyen tekrarlı yüklerdendir.

Sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerde deprem yüklerinin yıkıcı etkilerinden biri olabilecek zemin sıvılaşması; deprem sonrası yapı, sağlamlığından ötürü bütünlüğünü korusa dahi yapının yan yatması, zemin içine batması veya yapıda farklı oturmaların oluşması gibi önemli hasarlara sebep olabilmektedir. Sıvılaşma riski önceden alınacak tedbirlerle en aza indirilmediği takdirde olası depremlerde yaşanabilecek can ve mal kayıpları çok daha ciddi boyutlara ulaşacaktır.

1964 yılında üç ay arayla meydana gelen Alaska (M_w=9,2) ve Niigata (M_S=7,5) depremlerinde zemin sıvılaşmasının sebep olduğu şev göçmesi, köprü ve yapı temellerinde toptan göçmeler, gömülü yapıların zemin yüzeyine çıkarak yüzer konuma gelmesi gibi ciddi hasarların oluşması sonucu sıvılaşmanın etkilerini ve sıvılaşma riskini azaltmaya yönelik birçok deneysel çalışma yapılmıştır [1]. Zeminlerin sıvılaşma potansiyelini belirlemek amacıyla laboratuvarda ve arazide yapılan deneyler sayesinde sıvılaşma analiz metotları geliştirilmiştir. Bu metotlar aracılığıyla tespit edilen sıvılaşma riski, yapısal önlemler alınarak veya teknolojinin de ilerlemesiyle birlikte sürekli

gelişmekte olan zemin iyileştirme yöntemleri uygulanarak azaltılmaya çalışılmaktadır. Sıvılaşma riskini azaltmaya yönelik uygulanan zemin iyileştirme yöntemlerinin genel olarak iki açıdan fayda sağlaması amaçlanmaktadır. Bunların ilki, sıvılaşma anında zeminde oluşabilecek aşırı boşluk suyu basıncının hızla sönümlenmesi, ikincisi ise zeminin kayma direncinin arttırılmasıdır.

Zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirme konusunda etkili bir yöntem olan "katkı malzemeleriyle zemin iyileştirme" uygulaması; çimento, kireç, uçucu kül vb. malzemelerin zeminle karıştırılarak yapılabilmesinin yanı sıra doğal ve yapay fiberlerin katkı malzemesi olarak kullanılması suretiyle de gerçekleştirilebilmektedir. Fiber malzemeler, sahip oldukları yüksek çekme mukavemeti sayesinde, katkı malzemesi olarak sadece çimentonun kullanıldığı zeminlerin gevrek davranış göstermesini engelleyebilmektedir [2]. Bununla birlikte, fiber katkılı zeminler, katkısız zeminlere kıyasla daha yüksek kayma direncine sahip olabilmektedir.

Doğal fiber çeşitlerine hindistan cevizi, bambu ve palmiye ağacından üretilen fiberler, şeker kamışı ve hint kenevirinden elde edilen lifler; yapay fiberlere ise polietilen, polyester, polipropilen, cam fiber ve çelik lifler örnek gösterilebilir [3]. Zemin iyileştirmesinde kullanılabilecek doğal fiberlere verilebilecek örneklerden biri de bazalt liflerdir. Yüksek çekme dayanımına sahip çevre dostu bazalt liflerin, yerkabuğunda yaygın olarak bulunan bazalt kayaçlardan dolayı ham maddesinin ucuz ve üretim maliyetinin düşük olmasına rağmen geoteknik uygulamalarında kullanımına yönelik çalışmalar ancak son birkaç yılda yapılmaya başlanmıştır.

Bu tez çalışmasında; bazalt fiber ve çimento katkısının sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerin geoteknik özelliklerine olan etkisi araştırılmış, yapılan deneysel çalışmalarla zemin iyileştirme çalışmalarının etkin yönetimi konusunun desteklenmesi hedeflenmiştir.

Deneysel çalışma aşamasında, sıvılaşma potansiyeline sahip kum zemine ağırlıkça %2,5, %5, %10 oranında çimento ve %1, %2, %3, %4 oranında bazalt fiber katılarak karışım numuneleri hazırlandıktan sonra karışım numuneleri ve katkısız numune üzerinde öncelikle kompaksiyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Kompaksiyon deneyi sonucunda belirlenen optimum su içeriğinde hazırlanmış numunelerin, maksimum kayma dayanımı ve kayma mukavemeti parametrelerini bulmak üzere kesme kutusu deneyi, serbest basınç dayanımlarını elde etmek için serbest basınç deneyi, taşıma gücü oranlarını tespit etmek için ise CBR deneyi gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerin sonuçları analiz edilerek kum

zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerini güçlendirmeye yönelik en uygun karışım oranları tespit edilmeye çalışılmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen verilerin değerlendirilmesi neticesinde ortaya konulacak bulguların zayıf zeminlerin katkı malzemeleriyle iyileştirilmesine yönelik geoteknik mühendisliği uygulamalarına katkı sağlayacağı amaçlanmaktadır.

Çalışma kapsamında, sıvılaşma ve zemin iyileştirme yöntemlerine değinildikten sonra çeşitli fiber katkılarıyla zemin güçlendirmesine yönelik daha önce yapılan deneysel çalışmaların bir özeti sunulmuştur. Tezin sonraki bölümünde numunelerin içeriğini oluşturan malzemeler ve deneysel yöntem hakkında bilgiler verilmiştir. Son olarak deney sonuçlarından elde edilen veriler ve oluşturulan grafikler ortaya konularak bu bilgiler ışığında tartışma ve sonuç bölümlerine geçilmiştir.

1.1. SIVILAŞMA

Suya doygun kohezyonsuz gevşek zeminlerin, drenajsız koşullar altında tekrarlı yüklere maruz kaldığı durumlarda boşluk suyu basıncında ani artışlar olmaktadır. Bu ani artışın sebebi, kayma gerilmeleri altında hacimleri daralmaya zorlanan bu tip kohezyonsuz zeminlerdeki boşluk suyunun, hacim azalmasına karşı koymaya çalışmasıdır. Boşluk suyu basıncının artması, zemin taneleri arasındaki efektif gerilmenin azalmasına yol açar. Bunun sonucunda zemin kayma direncini kaybeder ve adeta bir sıvı gibi davranış göstererek büyük şekil değiştirmelere uğrar. Bu olay sıvılaşma olarak adlandırılmaktadır [4]. Sıvılaşmanın ardından aşırı boşluk suyu basıncı sönümlenmekte, suyun drene olmasıyla birlikteyse zeminde oturmalar meydana gelmektedir. Oturmaların oluştuğu zeminin hacmindeki azalma, dışarı çıkan boşluk suyunun hacmine eşit olmaktadır.

Zeminlerdeki sıvılaşma eğilimini ilk kez 1920'de Hazen fark etmiştir. Hazen, California Calaveras Barajı'nın zemininde oluşan akma yenilmelerinin sebebini zeminlerin sıvılaşabilen davranışına bağlamıştır [5]. Casagrande, 1936'da kohezyonsuz zemin özelliklerinin, şev stabilitesi ve toprak dolgular üzerindeki etkisi ile ilgili yaptığı çalışmada, "kritik boşluk oranı" kavramını kullanarak, kum zeminlerdeki sıvılaşmanın ne tür şartlarda meydana gelebileceği üzerinde durmaktadır. Bu çalışma, kritik boşluk oranını aşan zeminlerin, kayma gerilmesi altında hacimsel daralmaya uğraması sonucu, drenajsız koşullarda zemin daneleri arasında aşırı boşluk suyu basıncının oluşacağını ortaya koymaktadır [6]. "Sıvılaşma" kavramı ise ilk olarak 1953'te Mogami ve Kubo

tarafından ortaya atılmış olup tarihsel süreçte; drenajsız yükleme şartlarında, tekrarlı yüklerin etkisinde kalan suya doygun kohezyonsuz zeminlerin davranış sistemlerini belirtmek amacıyla kullanılmıştır [1].

1964'te yaşanan Alaska ve Niigata depremleri sonucunda oluşan sıvılaşmanın neden olduğu şiddetli hasarlar neticesinde, sıvılaşma ile ilgili araştırmalarda artış olmuştur. Bu dönemde Seed ve grubundaki araştırmacılar, sıvılaşmanın tetiklenmesi için gereken yükleme koşulları üzerine çalışmalar yapmışlardır [1].

1.1.1. Sıvılaşma Türleri

Akma türü sıvılaşma (flow liquefaction) ve çevrimsel hareketlilik (cyclic mobility) olmak üzere iki çeşit sıvılaşma türü bulunmaktadır.

Akma türü sıvılaşma, zemin kütlesinin statik kayma gerilmesi, sıvılaşmış olan zeminin kayma direncinden büyük olduğu durumlarda oluşmaktadır. Aniden ortaya çıkan kuvvetin etkisiyle tetiklenen statik haldeki zemin, statik kayma gerilmeleri altında büyük şekil değiştirmelere maruz kalmakta ve akma göçmesi meydana gelmektedir. Deprem sona erdikten sonra bile büyük ve hızlı zemin hareketleri devam etmekte, taşıma gücü kayıpları ve şev göçmeleri meydana gelmektedir.

Çevrimsel hareketlilik ise, akma sıvılaşmasının tersine, zemin kütlesinin statik kayma gerilmesi, sıvılaşmış olan zeminin kayma direncinden küçük olduğu durumlarda meydana gelmektedir [1]. Zeminde, yanal akmalar olarak da nitelendirilebilecek sürekli ve sınırlı deformasyonların oluştuğu bu sıvılaşma türünde deprem sonrasında zemin hareketi devam etmemektedir.

Sıvılaşmanın oluşum mekanizması, zemin daneleri arasındaki temas kuvvetleri ile birlikte değerlendirilerek dikkate alındığında; akma sıvılaşması yerine "tam sıvılaşma", çevrimsel hareketlilik yerine ise "sınırlı sıvılaşma" kavramları kullanılabilmektedir [7].

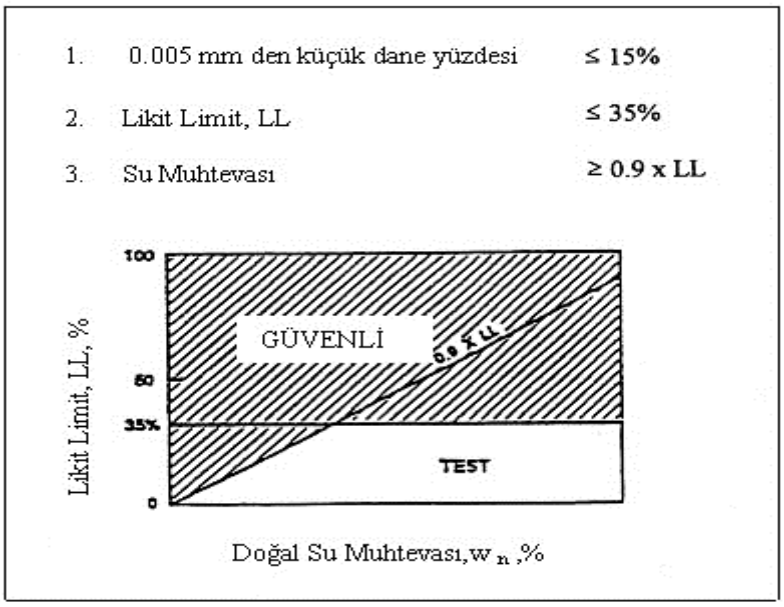
1.1.2. Sıvılaşma Potansiyeli Olan Zemin Türleri

Sıvılaşma analizini yaparken, öncelikle zemin profilinde sıvılaşma ihtimali olan zemin tabakalarının olup olmadığına dikkat etmek gerekmektedir. Bu da ne tür zeminlerin sıvılaşabildiği sorusunu ortaya çıkarmaktadır. Sıvılaşma belli yeraltı şartlarında oluşmaktadır; her durumda ortaya çıkmayabilir. Sıvılaşma, daha çok genç ve gevşek çökellerin, kum ve silt dane çapındaki malzemenin biriktiği; yeraltı su seviyesinin zemin yüzeyine yakın olduğu (yüzeyden en fazla 10 m derinlikte) jeolojik ortamlarda

gerçekleşmektedir. Ancak nadiren de olsa, yeraltı suyu tablasının 20 m'yi aşan derinlikte bulunduğu bazı zeminlerde de sıvılaşmanın gerçekleştiği gözlenmiştir. Akarsu, taşkın ovası, taraça ve kıyı alanlarında birikmiş olan çökellerin, sıvılaşma eğilimi en yüksek olan çökellerden olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte, rölatif sıkılığı %47'nin altında olan zeminlerdeki daneler daha gevşek bir diziliş gösterecekleri için bu tip zeminler sıvılaşmaya daha yatkındırlar [8].

İri daneli ve çakıllı zeminler de tekrarlı yükler altında, kum zeminlerin sahip olduğu özelliklere benzer özellik göstererek sıvılaşabilme potansiyeline sahip olmaktadırlar. Fakat bu zeminler, kumlu zeminlere göre daha geçirimlidirler. Bu nedenle, sismik yükler altında meydana gelen aşırı boşluk suyu basıncını daha hızlı dağıtmaları mümkündür. İri ve ağır danelerden meydana geldikleri için de gevşek oldukları duruma nadir rastlanmaktadır. Drenaj mesafesi uzun olduğunda ya da plastik olmayan ince daneli malzemenin çakılların arasını doldurduğu koşulda, iri daneli ve çakıllı zeminler sıvılaşabilmektedir. Böyle koşullarda, iri daneli zeminlerin sıvılaşabilme ihtimalinin göz önüne alınması ve sıvılaşma hesaplarının yapılması gerekmektedir [9].

İnce daneli zeminlerin sıvılaşabilirliği konusu ise üzerinde tartışmaların halen devam ettiği bir konudur. Şekil 1.1'de belirtilmiş olan Çin kriterlerine göre ince daneli zeminlerde sıvılaşmanın meydana gelmesi için kil oranının %15'ten az, likit limitin (LL)<%35 ve doğal su muhtevasının (w_n)>0,9xLL olması koşullarının birlikte sağlanması gerekmektedir.



Şekil 1.1. Çin kriterlerine göre sıvılaşma koşulları [10].

Çin kriterlerinde belirtilen sıvılaşma koşullarına ait sınır değerler Andrews ve Martin tarafından yeniden gözden geçirilerek Çizelge 1.1'de gösterilmiş olan değiştirilmiş Çin kriterleri önerilmiştir.

Çizelge 1.1. Değiştirilmiş Çin kriterleri [10].

	Likit Limit < 32	Likit Limit ≥ 32
Kil İçeriği <10%	Sıvılaşabilir	İleri çalışma gerekir. (Plastik kil harici boyutlu dane olduğu düşünülerek- mika gibi)
Kil İçeriği≥10%	İleri çalışma gerekir. (Plastik olmayan kil boyutlu dane olduğu düşünülerek– maden veya ocak atığı gibi)	Sıvılaşmaz

Belirtilmiş olan bu ölçütlerin yanı sıra zeminlerin sıvılaşabilmesi için malzemenin doygun veya doyguna oldukça yakın ve dinamik yükün drenaja izin vermeyecek hızda etkimiş olması gerekmektedir [9].

1.1.3. Sıvılaşmaya Karşı Alınabilecek Tedbirler

Sıvılaşmadan kaynaklanabilecek hasarları en aza indirmek için ilk olarak sıvılaşma tehlikesinin tespit edilmesi gerekmektedir. Zeminin sıvılaşmaya karşı duyarlılığına bakılarak, sıvılaşmanın olma ihtimali değerlendirilmelidir. Sıvılaşma olasılığının yüksek çıkması durumunda, zeminin ve/veya üzerine inşa edilecek yapının zarar görmesini engellemeye yönelik gerekli tedbirler ve uygulamalar değerlendirilmelidir.

Sıvılaşma potansiyeline sahip zeminler üzerine inşa edilmesi düşünülen yapıların projelendirilmesi ve uygulanmasına yönelik karar aşamasında üç farklı yöntem devreye girmektedir:

- Zemini, sıvılaşma ihtimaline karşı iyileştirmek
- Yapısal tasarımı, sıvılaşma riskini göz önüne alarak gerçekleştirmek
- Bulunan diğer çözümler maliyetli olduğunda, projenin uygulanması için sıvılaşma tehlikesi bulunmayan yerleri seçmek.

1.2. ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Zemin iyileştirmesinde uygulanabilecek yöntemler iki esasa dayanmaktadır:

✓ Zemini, sismik kuvvetler altında zemin tabakasının dayanımını kaybederek göçmeye ya da aşırı şekil değiştirmeye maruz kalmasını engelleyecek şekilde iyileştirmek

✓ Sismik yükler anında ortaya çıkan aşırı boşluk suyu basıncının hızla sönümlenmesini sağlamak.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte sıvılaşma ihtimaline karşı uygulanabilecek zemin iyileştirme yöntemleri de gün geçtikte artmaktadır. Zemin iyileştirme yöntemlerinin, zaman içinde artması ve çeşitlenmesi nedeniyle; farklı kaynaklarda, birbirinden farklı ve detaylı sınıflandırmalarla karşılaşmak mümkündür.

Türkiye Cumhuriyeti Ulaştırma Bakanlığı'nın yayınlamış olduğu, sıvılaşmaya karşı uygulanabilecek zemin iyileştirme yöntemleri ve bu yöntemlerin kısa açıklamaları Çizelge 1.2'de sunulmuştur.

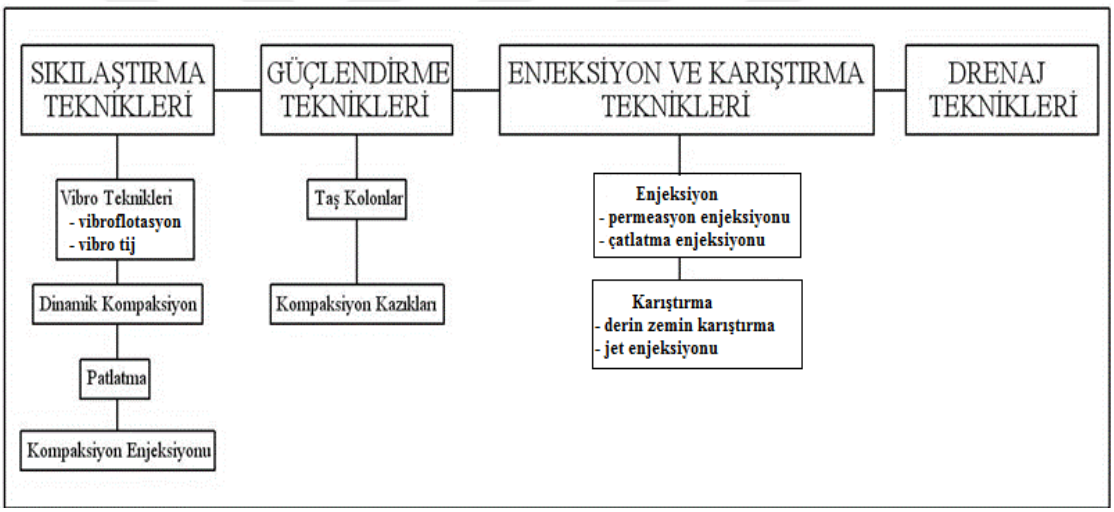
Çizelge 1.2. Zemin sıvılaşmasına karşı uygulanabilecek iyileştirme yöntemleri [11].

Genel Kategori	İyileştirme Yöntemi	Notlar
I. Kazı ve/veya Sıkılaştırma	(a) Sıvılaşabilir zeminin kazılması ve sahadan uzaklaştırılması (b) Sıvılaşabilir zeminin kazılıp aynı zeminin sıkıştırılarak yeniden yerleştirilmesi (c) Sıvılaşabilir zeminin yerinde sıkılaştırılması	Sıvılaşabilir zeminin kazılması ve sahadan uzaklaştırılması genellikle ekonomik bir yöntem değildir. Sıvılaşabilir zemin tabaka derinliğini aşan temel derinlikleri mümkünse düşürülmelidir.
II. Yerinde sıkılaştırma yöntemleri	(a) Titreşimli sonda ile kompaksiyon (b) Dinamik kompaksiyon (Ağırlık düşürme) (c) Sıkılaştırma (kompaksiyon) kazıkları (d) Patlatma ile derin sıkıştırma (e) Sıkılaştırma Enjeksiyonu	Titreşimle sıkılaştırma temiz kumlarda etkin bir yöntemdir ve çakıl kolonlarla beraber de kullanılabilir. Sıkılaştırma kazıkları zemine iletilen kayma gerilmelerinde bir azalmaya yol açarak sıvılaşmaya karşı direnci artırır.
III. Diğer zemin iyileştirme yöntemleri	(a) Sızma enjeksiyonu (b) Yüksek Basınçlı Jet Enjeksiyonu (c) Derin karıştırma (d) Drenler - Çakıl drenler - Kum drenler - Şerit direnler (e) Ön yükleme	Sızma enjeksiyonu çakıllı ve temiz kum karışımlarında etkin olarak kullanılır. Birçok dren kurulum işlemi sırasında aynı zamanda zemin de sıkılaşmaktadır.

Çizelge 1.2 (devam). Zemin sıvılaşmasına karşı uygulanabilecek iyileştirme yöntemleri [11].

IV. Banket, hendek, sahil duvarı, ve diğer istinat yapıları ve sistemleri	(a) Serbest yüzeyde istinat duvarları veya destek yapıları ile büyük yanal yayılmaları önlemek	Kıyı liman yapılarında ve sahil kenarındaki yapılaşmalarda sıklıkla tercih edilir.
V. Derin temeller	(a) Çakma kazıklar (b) Fore kazıklar	Zemin sıkılaştırması sağladığı gibi zemine aktarılan kayma gerilmelerinde azalmaya sebep olarak sıvılaşmaya karşı direnci artırır.

Zemin iyileştirme yöntemlerine yönelik yapılmış bir diğer sınıflandırma ise uygulanabilecek teknikleri Şekil 1.2'de görüldüğü üzere dört ana gruba ve alt gruplara ayırmaktadır.



Şekil 1.2. Zemin iyileştirmesinde uygulanabilecek yöntemler [1].

1.2.1. Sıkılaştırma Yöntemleri

Sıkılaştırma, sismik tehlikeleri azaltmak için uygulanan etkili zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir. Sıkılaştırma yöntemleri; zemin taşıma kapasitesini arttırmak, zemindeki oturmaların kontrolünü sağlamak, sıvılaşma riskini ortadan kaldırmak veya asgari düzeye indirmek için uygulanmaktadır. Sıkılaştırma işleminde en çok uygulanan teknikler; vibro teknikleri (vibroflotasyon ve vibro tij), dinamik kompaksiyon, patlatma ve kompaksiyon enjeksiyonudur.

Vibroflotasyon, vibro tij (vibrokompaksiyon), dinamik kompaksiyon ve patlatma; sıvılaşma potansiyeline sahip temiz kum ve çakıllı zeminlerde etkili olmaktadır [1].

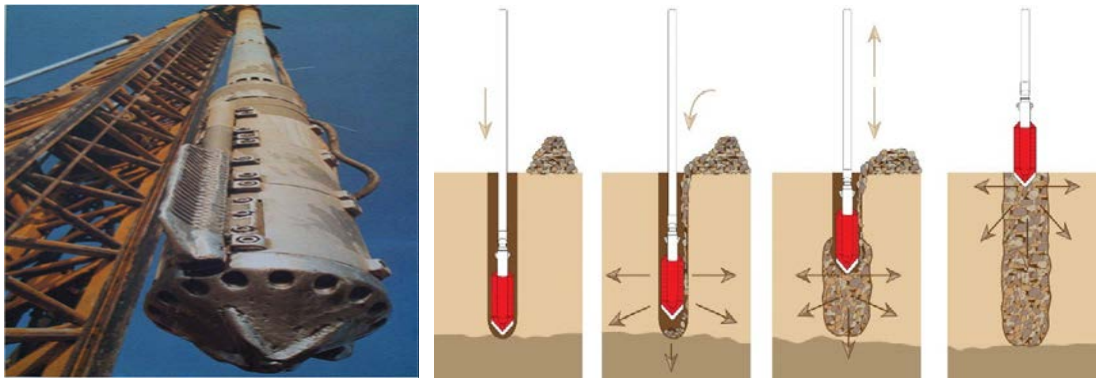
1.2.1.1. *Vibro Teknikleri*

Vibro teknikleri, zemini, bütün katmanı boyunca bir ağ biçiminde sıkıştırma işlemi olarak tanımlanmaktadır. Yatay titreşim (vibroflotasyon) ve düşey titreşim (vibrokompaksiyon) yayılması olmak üzere iki grupta ele alınmaktadır [1].

Vibroflotasyon yöntemi, 1930larda Almanya'da geliştirilmiş bir yöntem olup, yeraltı su tablasının altında bulunan gevşek kumlu zeminlerin derin kompaksiyonu için uygulanmaktadır [12]. Vibroflotasyon, en çok, ince tane oranı %20'den, kil oranı ise %3'ten az olan; temiz, granüle zeminlerde etkili olmaktadır [13].

Vibroflotasyon tekniğinde; zeminin içine yerleştirilen özel bir vibratörün titreştirilmesi sonucu zeminin dane yerleşim yapısının bozulması ve danelerin birbirine yaklaşmaya zorlanması, böylece zeminin sıkılaşması amaçlanmaktadır. Bu yöntem uygulanırken, 30 m'lik bir derinliğe inilebilmekte; bu derinlik boyunca, belli aralıklarla sıkıştırma işlemi yapılmaktadır [8].

Vibroflotasyon tekniğinde bir zemin çökelini sıkılaştırmak için, bir vince asılan prob (vibroflot) kullanılmaktadır. Genellikle 30-46 cm çapında ve yaklaşık 3,0-4,9 m uzunluğundaki vibroflotlar, elektrik veya hidrolik güç ile hareketi sağlanan merkezi bir şaft üzerine monte edilmiş bir ağırlık içerirler. Vibroflot, su veya hava jetlerinin de yardımıyla zemin çökelinin en alt noktasına kadar batırılmakta ve uygulanan yatay titreşimler altında zeminin sıkışması sağlanmaktadır. Sondanın oluşturduğu çöküntü konisi, üstten granüle (temiz kum veya çakıl) malzeme ilave edilerek doldurulmaktadır. Böylece vibroflot yukarıya doğru çekilirken geride Şekil 1.3'te görseli bulunan sıkılaşmış bir zemin kolonu bırakır [1].



a) b)

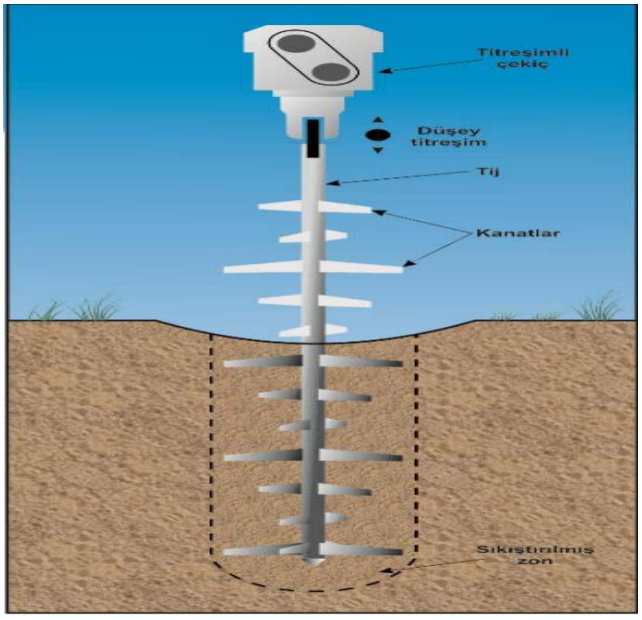
Şekil 1.3. Vibroflotasyon a) Vince asılı prob (sonda) b) Vibroflotasyon uygulaması [7].

Kullanılan dolgu malzemesinin nitelikleri ve zeminin dane çapı dağılımı, iyileştirme yönteminin verimliliğini etkilemektedir. Vibrasyon, zemin danelerinin arasında bulunan sürtünmeyi azaltarak, iç gerilme oluşturmadan danelerin tekrar sıkıca yerleşmesini sağlamaktadır. Sıkışabilirlik ve başlangıç boşluk oranı, uygulama sonrasında önemli ölçüde azalmakta; zeminin içsel sürtünme açısındaki artışla birlikte sıvılaşmaya karşı gösterdiği direnç ve taşıma gücü artmaktadır [14].

Vibro tij (vibrokompaksiyon) sistemleri, titreşimli kazık çakma çekici kullanılarak uzun bir sondanın zemin içinde titreştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Sonrasında prob zemin yüzeyine doğru geri çekilmekte ve bu esnada vibrasyonu sürdürmek suretiyle zemini sıkıştırmaya devam etmektedir. Zemin yüzeyinde veya altında sıkıştırmadan kaynaklanan oturmayı önlemek amacıyla ilave zemin kullanılabilmektedir.

Granüler zeminlerin sıkıştırılması için derinde malzeme eklenmesine gerek duyulmayan vibro tij tekniğinde, zemin yüzeyinde oluşacak çöküntü konileri ise geri dolgu malzemesiyle doldurulmaktadır. Bu tekniğin uygulanabilmesi için kohezyonsuz zemin içerisindeki ince daneli malzeme miktarı en fazla %15 olmalıdır [13].

Vibrokompaksiyon yönteminde; titreşimler, vibroflotasyonun aksine, düşey doğrultuda uygulanmaktadır. Prob çalışma hızı, vibroflotasyona göre daha yüksek olmasına karşın; vibro tijlerin etki edebildiği alan genişliği ve çevresindeki zeminin rölatif sıklığı, vibroflotasyona göre daha düşük olmaktadır [7]. Vibro tij tekniğine ilişkin görsel Şekil 1.4'te sunulmuştur.



Şekil 1.4. Vibro tij tekniğinin şematik gösterimi [15].

1.2.1.2. *Dinamik Kompaksiyon*

Dinamik kompaksiyon; genellikle 5 ton ile 27 ton arası ağırlıkta olan bir yükün, 12 m ile 30 m arasında değişen yüksekliklerden zemine tekrarlı düşürülmesiyle uygulanan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Karelaj yapılarak ayrılmış olan alanlara, bir ya da daha fazla geçişle, kademeli bir uygulama yapılmaktadır. Her geçiş sonrası meydana gelen çukurlar, iyi derecelenmiş granüler zemin ile doldurulmaktadır [11].

Bu yöntem, üç aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada; önceden saptanan noktalara, yüksek enerji ile düşüş yapılmaktadır. İkinci aşamada; daha az enerji ile saptanan noktalar arasına da düşüş yapılmakta ve zemin sıkılaştırılmaktadır. Üçüncü aşamada; kalan diğer noktalara, çok daha az enerji verilerek yüzeyler düzeltilmektedir. Şekil 1.5'te dinamik kompaksiyon uygulaması ve düzeneği gösterilmektedir.



a) b)

Şekil 1.5. Dinamik kompaksiyon a) Dinamik kompaksiyon uygulaması b) Dinamik kompaksiyon düzeneğinin şematik gösterimi [7], [13].

Dinamik kompaksiyon uygulandıktan sonra, boşluk suyu basıncı yükselmekte ve zemin daneleri sıkılaşmaktadır. Sonrasında, artık boşluk suyu basıncının da sönümlenmesiyle birlikte zeminde yüksek oranda sıkılaşma sağlanmaktadır. Dinamik kompaksiyon kohezyonlu zeminlerde etkin bir yöntem olmasına karşın genellikle sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerde uygulanmaktadır [1]. Zemin sınıfı, yükü düşürme yüksekliği, yükün ağırlığı ve düşürüldüğü alanlar arasındaki mesafe dinamik kompaksiyon yöntemini önemli ölçüde etkilemektedir [16]. Bu yöntem, sıvılaşmaya karşı uygulanan, etkili ve ekonomik zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olarak kabul edilmektedir.

1.2.1.3. *Patlatma*

Patlatma yöntemi; gevşek granüler zeminlerin içinde sondaj ya da su jeti kullanılarak açılmış olan ve aralarında 5 m ile 15 m arasında bir mesafe bulunan kuyuların içine, 3 m ile 6 m arasında değişen aralıklarla patlayıcı yerleştirilerek uygulanmaktadır. Bu yöntemde, en iyi sıkılaştırma için; patlayıcılar, tekrarlı ve gecikmeli zamanlama yapılarak, uygulama yerleri şaşırtmalı olacak şekilde patlatılmaktadır. Patlamaların etkisiyle çatlaklardan gaz ve su çıkışı olmakta, aynı zamanda zemin yüzeyinde kabarmalar oluşmaktadır. Artık gaz ve su basıncının sönümlenmesiyle birlikte ise zemin yüzeyinde oturmalar meydana gelmektedir. Bu yöntem, en çok, içinde en fazla %20 silt ve %5'ten az kil olan gevşek kum zeminlerde etkili olmaktadır. Çünkü silt ve kil tabakaları, patlamanın etkisini büyük oranda düşürmektedir. Patlatma yönteminin, patlamanın etkisiyle ortaya çıkan şok dalgalarının etkin bir şekilde ilerleyebilmesi için doygun zeminlerde uygulanması önerilmektedir [1].

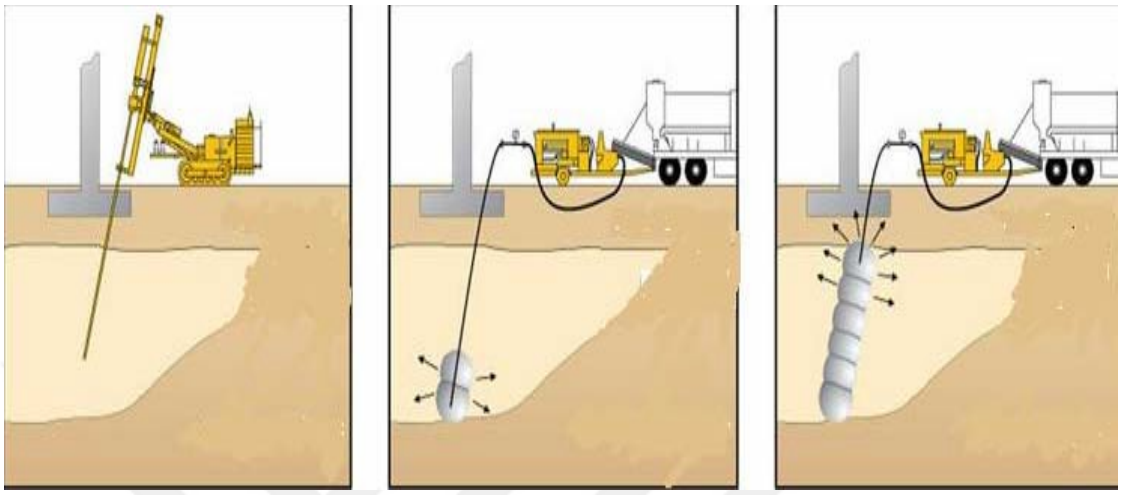
Bu yöntemi, diğer zemin iyileştirme yöntemlerinden üstün kılan özelliği 40 metre derinliğe kadar olan noktalarda bile etkili olabilmesidir. Özel bir donanıma ihtiyaç duyulmayan ve kolay uygulanabilen bir yöntem olduğu için de ekonomik bir yöntem olarak kabul edilmektedir [7].

1.2.1.4. *Kompaksiyon Enjeksiyonu*

Kompaksiyon enjeksiyonu, Amerikan İnşaat Mühendisleri Birliği (ASCE) tarafından, 25 mm'den az çökme (slump) değerine sahip, gerekli plastisiteyi sağlayacak oranda silt ve içsel sürtünmeyi sağlayabilecek oranda kum içeren enjeksiyon malzemesinin, zemin içindeki boşluklara girmeden enjeksiyon çevresinde gittikçe genişleyen bir kütle oluşturarak etrafındaki gevşek zeminleri sıkıştırabilecek kadar yüksek basınçlarda zemine enjekte edilmesi olarak tanımlanmaktadır [17].

Kompaksiyon enjeksiyonu yöntemi, titreşimli olmayan bir yöntem olduğu için her çeşit zeminde uygulanabilmektedir. Bu yöntem, genellikle kumlu ve plastik olmayan siltli zeminlerde kullanılmaktadır [1]. Zayıf ve yumuşak zeminleri sıkılaştırmak, temel ve döşemeleri alttan destekleyerek farklı oturmaları ortadan kaldırmak amacıyla uygulanmaktadır [17]. Dar alanlarda çalışmaya uygun ve titreşim yaratmadan uygulanabilir olmasının yanı sıra temiz bir yöntem olduğu için kullanımı yaygındır; ancak, dinamik kompaksiyon ve vibro teknikleri uygulamalarına kıyasla maliyeti genellikle daha yüksektir.

Şekil 1.6'da bir uygulama örneği gösterilmiş olan kompaksiyon enjeksiyonu, mevcut yapılarda da uygulanabilmesi özelliğiyle, temel oturmalarının giderilmesi ve yapıların eski seviyelerine yükseltilmesi noktasında yaygın olarak kullanılan bir yöntem olmaya devam etmektedir.



Şekil 1.6. Mevcut bir tekil temele kompaksiyon enjeksiyonu uygulanması [13].

1.2.1.5. *Ön Yükleme*

Ön yükleme yöntemi, konsolidasyon teorisine dayanmaktadır. Sıkılaşabilen killerde, yüksek oturma değerlerinin engellenebilmesi amacıyla uygulanmaktadır. Yapı yükünden önce, zemine, bu değerden daha yüksek olan bir sürşarj yüklemesinin yapılmasıyla, tasarım yükünden kaynaklanacak olan oturma, inşaattan önce hızlıca tamamlanmaktadır. Böylece, yapı inşaatı bittikten sonra; oturma değerleri, izin verilebilir derecelerde kalmaktadır. İlk oturmanın olması için gereken zaman ve sürşarj yükünün büyüklüğü, konsolidasyon deneyinin parametreleriyle hesaplanmaktadır.

Ön yükleme, özellikle, sıkılaşabilen silt, organik kil ve doygun yumuşak kil zeminler için kullanıma uygun bir yöntemdir [14].

Ön yükleme sırasında ek dolgu uygulaması yapılırken, zeminin taşıma gücünü aşmamaya dikkat edilmelidir. Yapılan fazla yüklemeler; taşıma gücünün aşılmasına yol açarak, dolgunun zeminin içine batmasına sebep olabilmektedir.

En eski zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan ön yükleme yöntemini, 1568 yılında Mimar Sinan, Selimiye Camii'nin inşasında kullanmıştır [7].

1.2.2. Güçlendirme Yöntemleri

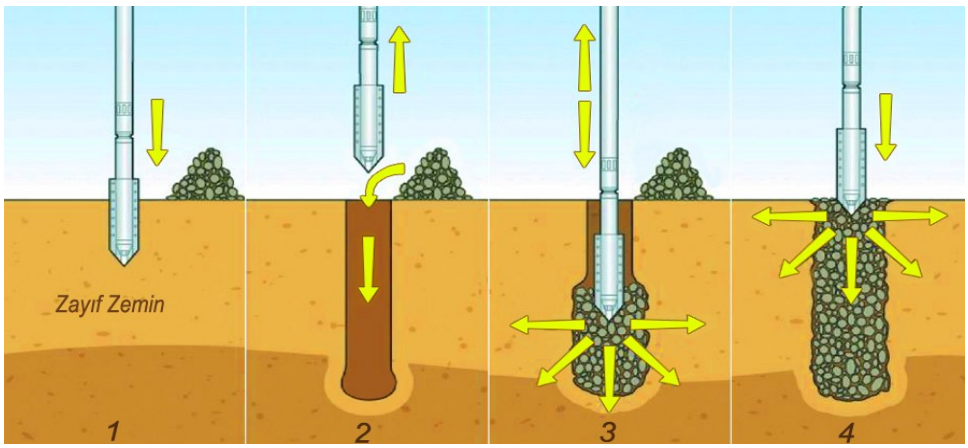
Güçlendirme yöntemleri, zeminin içine ahşap, beton, çelik ya da sıkılaştırılmış çakıl vb. malzemeler ekleyerek zeminin dayanım ve rijitliğini arttırma uygulamalarıdır.

1.2.2.1. *Taş Kolonlar*

Taş kolon uygulaması; yumuşak killer, siltler ve siltli kumlarda, zemin içine çakıl kolonlarını yerleştirme işlemidir. İlk olarak 1830'lu yıllarda Fransa'da, doğal zeminlerin iyileştirilmesi için uygulanmıştır. Taş kolon uygulaması; sıvılaşma riskini azaltmanın yanı sıra zeminin taşıma kapasitesini arttırmakta, konsolidasyonu hızlandırmakta, dolgu ve şevlerin stabilitesine katkı sağlamaktadır. Bu uygulama sayesinde, sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerde, deprem esnasında oluşabilecek aşırı boşluk suyu basıncının önüne geçilmektedir (düşey drenaj özelliği). Aynı zamanda; taş kolonun etrafındaki zeminde yanal gerilme artışı olmakla birlikte, taş kolonun yüksek yoğunluğu ve dayanımı sayesinde zeminin taşıma gücü artmakta, titreşim ve yer değiştirme sonucunda ise zeminde sıkılaşma meydana gelmektedir [18]. Çoğu alanda avantaj sağlaması nedeniyle, sıvılaşmaya karşı zemin iyileştirmesinde taş kolon yöntemi sık olarak kullanılmaktadır.

Taş kolon imalatında dolgu malzemesi olarak taş, kum, çakıl veya beton, briket ve tuğla kırıkları kullanılabilmektedir. Taş malzeme, zemin içerisine dik ve 0,6-1,0 m çapında olacak şekilde genellikle 20 m'ye kadar derinlikte yerleştirilir ve sıkıştırılır.

Taş kolonların imal edilme yöntemleri, genel olarak vibro kompaksiyon ve vibroflotasyonun imal edilme yöntemlerine benzerlik göstermekte olup taş kolon yönteminin uygulama aşamalarına ilişkin görsel Şekil 1.7'de sunulmuştur.



Şekil 1.7. Taş kolon imalat aşamaları.

1.2.2.2. *Kompaksiyon Kazıkları*

Betonarme ya da ahşap kazıkların, kalıcı olacak şekilde zemine çakılması yoluyla; içinde gevşek kum ve çakıl bulunan tabakalar sıkılaştırılabilmektedir. Kazıkların, eğilmeye karşı dayanımları yüksektir. Bu nedenle, zemin içindeki yanal yer hareketlerine karşı yüksek mukavemet göstermektedirler. Kazıklar çakılırken meydana gelen titreşimler ve yer değiştirmeler, sıkılaşmayı sağlamaktadır [1].

Günümüzdeki teknolojiyle, kompaksiyon kazıkları çoğunlukla çelik profillerden veya çelik borulardan imal edilmekte ve zemine dik ya da eğimli olacak şekilde çakılmaktadır. Çakma kazık olarak kullanılan, Şekil 1.8'de görseli sunulmuş olan kazıklar; kare, dairesel, altıgen betonarme ve öngermeli betonarme kazıklar olabileceği gibi bazen ahşap kazıklar da tercih edilebilmektedir.

Kompaksiyon kazıklarıyla zemin iyileştirme yönteminde, zemin çökelinin performansı, üç farklı sistemle iyileştirilmektedir. İlk olarak; kazıkların eğilme mukavemeti zemin hareketine karşı bir direnç oluşturmaktadır. Bu, güçlendirme olarak da düşünülebilir. İkinci olarak; kazıkların yerleştirilmesi sonucu meydana gelen titreşim ve yer değiştirmeler, sıkılaşmayı sağlamaktadır ve son olarak, yerleştirme sonrasında kazığı çevreleyen zemindeki yanal gerilmelerde artış meydana gelmektedir [19].



Şekil 1.8. Kompaksiyon kazık uygulaması ve prekast çakma kazıklar.

1.2.3. Karıştırma ve Enjeksiyon Yöntemleri

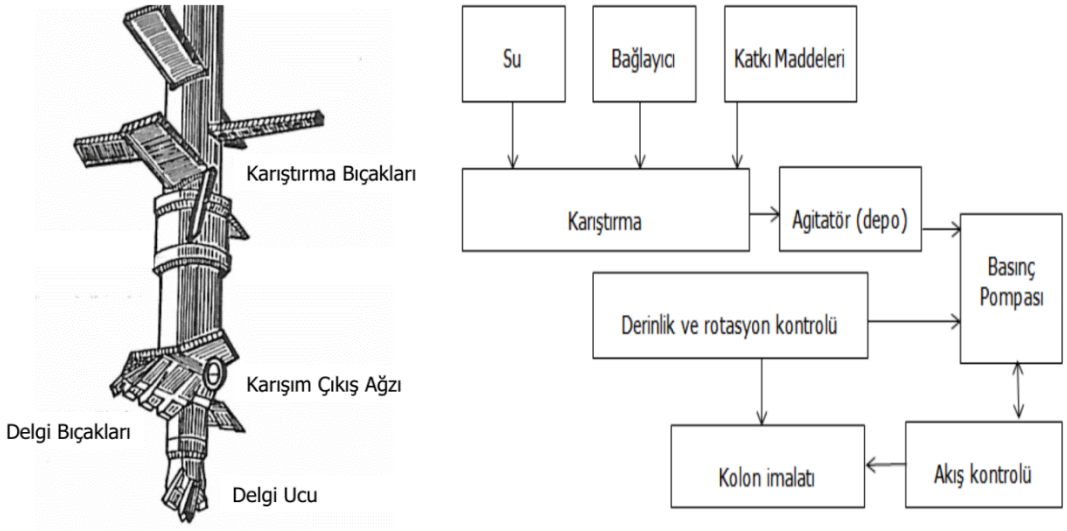
Zeminlerin birçok mühendislik özelliği, zemine bağlayıcı malzemeler ekleyerek zeminin karıştırılması veya bu bağlayıcı malzemelerin zemine direkt enjekte edilmesi yoluyla geliştirilebilmektedir. Zemin karıştırma yöntemi, zemine bağlayıcı malzemeler eklenerek zeminle bağlayıcı malzemenin fiziksel olarak iyice karıştırılması suretiyle zeminin yapısını tamamen değiştiren bir uygulamadır. Enjeksiyon yöntemleri ise; zeminin içine çeşitli bağlayıcı malzemelerin enjekte edilmesi suretiyle zeminin yapısında bulunan gözenekleri ve çatlakları doldurarak zemin daneleri arasındaki teması kuvvetlendirmek esasına dayanan tekniklerdir.

1.2.3.1. *Derin Zemin Karıştırma*

Derin zemin karıştırma yöntemi; zemin ile çimentolu malzemenin, özel karıştırma ekipmanlarıyla karıştırılması sonucu, zeminin içinde rijit kolonlar oluşturma işlemidir. İlk olarak 1954 yılında, Amerika Birleşik Devletleri'nde uygulanmıştır [20]. Bu yöntemde, Şekil 1.9'da görseli sunulmuş olan tek burgulu (0,5 m - 4 m çapında) veya yaklaşık 1,0 m çapında iki ile sekiz arasında değişen sayıda burgudan oluşan tijlerin zeminin içine dönerek indirilmesi sağlanmakta ve tijin ucundan enjekte edilen çimento şerbetiyle zemin karıştırılmaktadır. Belirlenen derinliğe indirildikten sonra, aynı hareketle zemin yüzeyine çıkartılan tijlerden, yukarıya çıkarma işlemi sırasında da bağlayıcı malzeme pompalanmaya devam etmektedir [1]. Bu işlemin sonucunda genel olarak 1,0 m çapa sahip rijit kolonlar elde edilmektedir. Farklı endüstriyel maddelerin çimentoyla birlikte bağlayıcı madde olarak kullanılabildiği bu yöntemin uygulama derinliği 60 metreye kadar çıkabilmektedir.

Derin zemin karıştırma yöntemi, genellikle; kazı destek duvarları, hidrolik geçirimsizlik perdeleri, zemin iyileştirmesi gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bu yöntem kullanılarak, sıvılaşma potansiyeli olan zemin güçlendirilmekte, boşluk suyu basıncı azaltılmakta ve sıvılaşma engellenmektedir.

Karıştırma işlemi sırasında, bağlayıcı malzemenin, zemin içerisinde kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi için en uygun ortamı hazırlayacak şekilde dağıtılması sağlanmalıdır. Bağlayıcının, zeminin güçlendirilmesine aktif olarak katkıda bulunması, bağlayıcı malzemenin oluşturulan karışım kolonu içinde düzgün bir şekilde dağılmış olmasına bağlıdır [13].



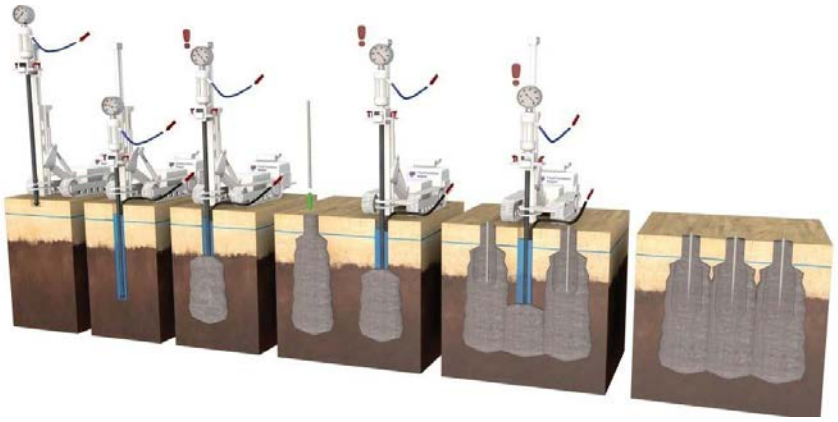
Şekil 1.9. Derin karıştırma düzeneği ve uygulamasının şematik gösterimi [21].

1995 yılında meydana gelen 7,2 büyüklüğündeki Kobe depreminde derin karıştırma yönteminin sıvılaşmayı önleme üzerindeki etkisini görmek mümkündür. Kobe Limanı'ndaki otel binasını çevreleyen duvarlar deniz tarafına doğru ciddi ölçüde yatay deplasman yapmasına rağmen, bina temel zemininde uygulanmış olan derin karıştırma kolonları sayesinde yapının kendisinde hasar oluşmamıştır [7].

1.2.3.2. *Jet-Grout (Jet Enjeksiyonu)*

Jet-grout yöntemi; tasarım derinliğine kadar zemine batırılmış enjeksiyon sondası zemin yüzeyine çıkarılırken, sondanın üzerindeki küçük çaplı deliklerden (nozul) 300 ile 600 bar aralığındaki bir basınçla zemin içerisine su-çimento karışımı püskürtülmesi ve bu sayede karışım kolonları oluşturulması esasına dayanmaktadır. Böylece geçirimliliği düşük, dayanımı yüksek kolonlar elde edilmektedir. Bu yöntem, organik olmayan her çeşit zemine uygulanabilmektedir.

Jet enjeksiyonu yöntemi, genellikle sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerin iyileştirilmesinde, tünel kazısından önce zeminin iyileştirilmesinde, iksa duvarları ve geçirimsiz perdelerde, derin temellerde kullanılmaktadır. Bu yöntem, ilk olarak Japonya'da, 1965'te uygulanmıştır. Jet-grout yöntemi; Şekil 1.10'da da görüldüğü üzere, delme, karışımın enjeksiyonu ve jet kolon imalatı aşamalarından oluşmaktadır.

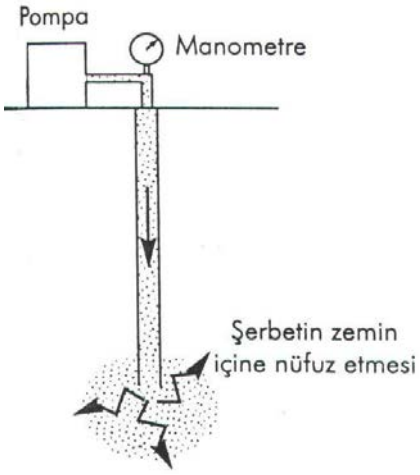


Şekil 1.10. Jet-grout uygulama aşamaları [16].

Diğer enjeksiyon yöntemleriyle karşılaştırıldığında, daha ekonomik ve hızlı bir yöntem olan jet enjeksiyonu yöntemi, ekipman boyutlarından dolayı dar alanlarda da çalışabilme imkanı vermektedir. Bu özelliklerinin yanı sıra titreşimsiz bir uygulama olması nedeniyle de sık başvurulan jet-grout yönteminde, jet kolonları, delgi ekipmanlarının teknik kapasitesine bağlı olmakla birlikte, istenilen derinlikte başlatılarak, projede yeterli görülen derinlikte sonlandırılabilmektedir [7].

1.2.3.3. *Permeasyon (Gözenek) Enjeksiyonu*

Permeasyon enjeksiyonu; partiküllü süspansiyonların veya düşük viskoziteli jelli çözeltilerin zemin içine enjekte edilmesi suretiyle uygulanmaktadır. Bu yöntem uygulanırken; düşük basınçlar altında, gözenek ya da çatlaklara kolayca akışabilecek malzemeler tercih edilmektedir. Permeasyon enjeksiyonu yöntemiyle zeminin geçirgenliğinin azaltılması sağlanmakla birlikte zemin, rijitliği arttırılarak güçlendirilmektedir. En eski zemin iyileştirme yöntemlerinden olan bu yöntem sayesinde enjeksiyon harcı ile zemin danelerinin arasında oluşan sıkı bağ, zemin tabakası içinde homojen ve kohezyonlu bir ağ yaratarak zeminin dayanımına katkı sağlamaktadır [22]. Permeasyon enjeksiyonunun şematik gösterimi Şekil 1.11'de sunulmuştur.

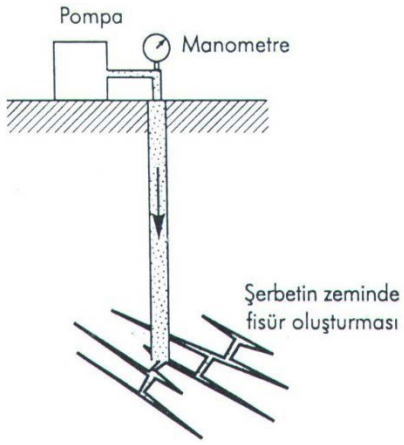


Şekil 1.11. Permeasyon enjeksiyonunun şematik gösterimi [1].

İnce dane oranının %15'ten fazla olduğu zeminlerde etkili kimyasal enjeksiyonun uygulanması zor olmakla birlikte bu oranın %20'yi aştığı zeminlerde gözenek enjeksiyonu yöntemini kullanmak mümkün olmamaktadır [13].

1.2.3.4. *Çatlatma Enjeksiyonu*

Çatlatma enjeksiyonu yönteminde, çimento şerbeti, zemin içerisinde kontrollü çatlaklar oluşturmak amacıyla basınçlı bir şekilde zemine enjekte edilmektedir. Bu yöntem uygulanırken çimento harcının zemin içerisindeki küçük boşluklara sızması istenmediğinden permeasyon enjeksiyonuna kıyasla daha viskoz enjeksiyon malzemesi kullanılmaktadır. Çatlatma enjeksiyonunun şematik gösterimi Şekil 1.12'de sunulmuştur.



Şekil 1.12. Çatlatma enjeksiyonu [1].

İyileştirmenin gerçekleştirilmesi amacıyla ilk çimento şerbetinin zemine enjekte edilmesinden sonra tekrarlanan çatlatma enjeksiyonu, zemini değişik düzlemler boyunca

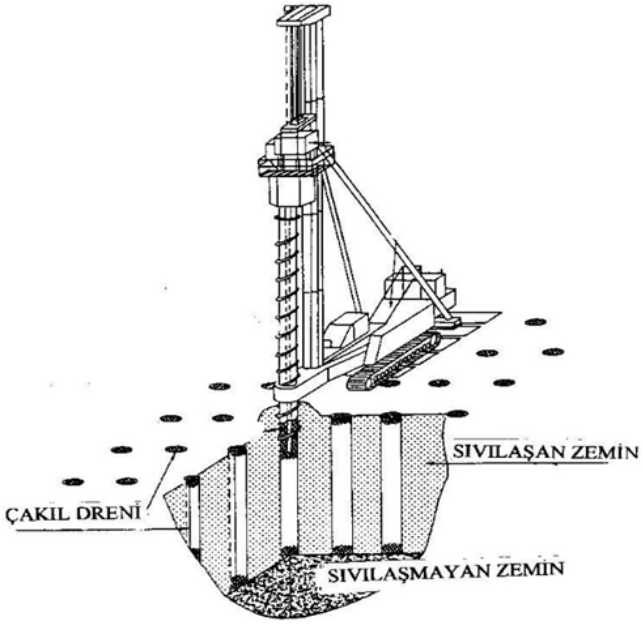
çatlatır. Bunun sonucunda birbirini kesen enjeksiyon merceklerinden oluşan üç boyutlu bir ağ ortaya çıkar. Ortaya çıkan bu ağ, zeminde bir miktar sıkılaşmanın oluşmasını sağlayabilmektedir; ancak, zeminin iyileşmesindeki ana etken, zemin kütlesindeki sertleşmiş enjeksiyon merceklerinin, zeminin rijitlik ve dayanımında artışa sebep olmasıdır [1].

1.2.4. Drenaj

Sıvılaşma sebebiyle meydana gelebilecek hasarlar, zeminin drenaj kapasitesinin artırılması veya yeraltı su seviyesinin düşürülmesi suretiyle azaltılabilmektedir.

Yeraltı su seviyesi düşürülerek temeller, dolgular, şevler ve istinat yapılarında sismik tehlikeler esnasında oluşabilecek ciddi hasarların önüne geçilebilmektedir [1]. Yeraltı su seviyesi, ince daneli geçirimsiz zeminlerde elektro-ozmos yöntemiyle; geçirimli zeminlerde ise kuyu sondajları ve sızdırmazlık duvarları ile düşürülmektedir.

Deprem sırasında ortaya çıkan aşırı boşluk suyu ortamdan ne kadar hızlı uzaklaştırılabilirse, zemin içerisinde oluşabilecek aşırı boşluk suyu basınçları da önemli ölçüde azaltılmış olacaktır. Bu bağlamda, zeminin drenaj kapasitesini yükseltmek ve taşıma gücünü arttırmak amacıyla Şekil 1.13'te şematik gösterimi bulunan çakıl drenler uygulanmaktadır [13]. Deprem nedeniyle oluşan aşırı boşluk suyu basınçlarının, taş kolonlar ile sönümlenmesi de bir drenaj yöntemi olarak sık başvurulan uygulamalardandır.



Şekil 1.13. Çakıl dren uygulaması [13].

1.2.5. Zemin Dondurma Yöntemi

Zemin dondurma işleminde; zemin daneleri arasındaki suyun sıcaklığı, dışarıdan uygulanan yöntemlerle düşürülmekte ve zemin suyu dondurularak buza dönüştürülmektedir. Buzlanmayla birlikte, zeminin hidrolik geçirgenliği azalmakta ve dayanımı artmaktadır. Bu yöntemle aynı zamanda, yer altı suyu seviyesinin hareketi engellenmekte ve kazı çalışmalarının yapılabileceği kuru bir ortam yaratılabilmektedir. Geçici bir iyileştirme yöntemi olan zemin dondurma işlemine, istinat duvarı gibi kalıcı bir yapı tamamlanana kadar devam edilmektedir.

İşlem, aktif ve pasif olarak adlandırılan iki aşamadan oluşmaktadır. Aktif aşamada, zemin suyunun dondurulmasıyla bir buz duvar oluşturulmaktadır. Pasif aşamada ise, çözünme ihtimaline karşı, duvarın bütünlüğü korunur [14].

Bu yöntem, şaft kuyusu açımında ve tünel mühendisliğinde yaygın kullanılmaktadır.

1.2.6. Geosentetik Kullanımı

Geoteknik mühendisliğinde 1970lerin sonundan itibaren kullanılmaya başlanmış ve kullanımı artan bir şekilde devam eden geosentetik malzemeler; polyester, polietilen, polipropilen vb. polimerlerden üretilmiş olan geotekstil, geogrid, geomembran, geonet ve geokompozitlerden oluşmaktadır. Geosentetik malzemeler; zemin taşıma gücünün arttırılmasında, erozyon kontrolünde, dolgu duvarların ve şevlerin güçlendirilmesinde kullanılmasının yanı sıra toprak setlerde, açık kanallarda şev kontrolünde, geçirimsiz, farklı zemin tabakalarını birbirinden ayırmada, yol temellerinde, eğimli arazideki hafif yapıların güvenliğinde ve drenaj kontrolünde de kullanılmaktadır [23].

1.2.7. Katkı Malzemeleriyle Zemin İyileştirme

Çimento, kireç, uçucu kül vb. katkılar, özellikle ince daneli zeminlerin mühendislik özelliklerini geliştirmek amacıyla zemin iyileştirmesinde kullanılabilmektedir. Katkı maddelerinin eklenmesi, ince daneli zeminlerin serbest basınç mukavemetinde, çekme ve kayma dayanımında önemli ölçüde artışa sebep olabilmektedir.

Katkı malzemelerinin zemine karıştırılması aşamasında üç farklı yöntem uygulanmaktadır. İlk yöntem olan "yerinde karıştırma yöntemi"; katkı malzemesinin, zemin tabakası üzerine düzgün bir şekilde dağıtılmasından sonra zeminin arazide karıştırılarak optimum su muhtevasında sıkıştırılması işlemidir. İkinci yöntem olan "sabit santral yöntemi" ise, zemini sabit bir santrale taşıyıp katkı maddesi ve su ekleyerek

karıştırdıktan sonra inşaat sahasındaki yerine geri yerleştirerek kompaksiyona tabi tutma esasına dayanmaktadır. “Gezici santral yöntemi” adı verilen son yöntemde, gezici bir mekanizma vasıtasıyla zemin yüzeyden alınarak içerisine katkı maddesi ve su katılıp karıştırılmakta ve sonrasında tekrar yüzeye yayılarak sıkıştırılmaktadır [24].

Fiber malzemeler de tek başlarına veya başka bir katkı malzemesiyle birlikte zeminlerin güçlendirilmesinde katkı malzemesi olarak kullanılabilmektedir. Doğal ve yapay olmak üzere birçok çeşidi bulunan fiber malzemeler, zeminlerin özellikle çekme ve kayma dayanımını artırmak suretiyle sismik tehlikeler karşısında zemin stabilitesini sağlamada önemli rol oynayabilmektedir.

Katkı malzemeleriyle zemin iyileştirmesi, güçlendirilecek zemin tabakası kalınlığının ve kazı derinliğinin fazla olduğu durumlarda diğer zemin iyileştirme yöntemlerine kıyasla daha maliyetli olduğundan pek tercih edilmemektedir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Zemin iyileştirmesinde, çimento vb. bağlayıcıların tek başına kullanımının zeminin bazı mekanik özelliklerini iyileştirmede yetersiz kalması, farklı katkı malzemelerinin zeminle karıştırılarak zeminlerin geoteknik özelliklerinin güçlendirilmesine yönelik araştırmaları beraberinde getirmiştir. Bu araştırmalarda kullanılan katkı malzemelerine verilebilecek bir örnek de doğal kaynaklardan elde edilen veya suni olarak üretilmiş fiberlerdir.

Sukontasukkul ve Jamsawang, çelik ve polipropilen liflerin derin karıştırma kolonlarında kullanımına yönelik yaptıkları çalışmada çimentonun tek başına katkı malzemesi olarak kullanıldığı zeminlerde, zeminin basınç mukavemetinin arttığını ancak gevrek davranış gösterdiğini belirtmişlerdir. Çimento katkısının çekme ve eğilme dayanımına etkisinin ise basınç dayanımına olan etkisine kıyasla çok daha düşük seviyelerde olduğunu ve yetersiz kaldığını ortaya koymuşlardır. Bu bağlamda, deprem tehlikesi ve buna bağlı olarak yatay doğrultuda şekil değiştirmeye maruz kalan zeminlerin basınç dayanımıyla birlikte çekme ve eğilme dayanımının da artırılmasının önemine dikkat çekerek kısa lif malzemenin çimento veya başka bir katkı malzemesiyle birlikte zemin iyileştirmesinde kullanılmasını önermişlerdir [2].

Starcher ve Liu, çimento ve fiber katkısı kullanarak gevşek zeminler üzerinde gerçekleştirdikleri serbest basınç deneyleri sonucunda, sadece çimento katkısının, basınç dayanımını kür süresinin artışıyla doğru orantılı bir şekilde artırdığını, fiber katkısının da zemine eklenmesiyle birlikte basınç dayanımında ciddi artışların gözlenmediğini ancak zeminin daha sünek bir davranış gösterdiğini belirtmişlerdir [25].

Bazalt fiber katkılı düşük plasiteli siltli zeminlerin kayma dayanımına yönelik yaptıkları çalışmada Kenan ve Özocak, siltli zemin numuneleri üzerinde kesme kutusu deneyini uygulayarak zemine ait kayma direnci parametlerini belirlemişlerdir. Karışımlarda kullanılan 24 mm uzunluğundaki bazalt lifin oransal olarak %1 ile %3 arasında değişim gösterdiği deneysel çalışmada optimum bazalt lif katkısının %1,5 olduğu sonucuna ulaşmışlardır [26].

Yol inşasında dolgu malzemesi olarak kullanılması düşünülen uçucu kül eklenmiş siltli zemine değişen uzunluklarda (6 mm, 12 mm ve 24 mm) ve oranlarda (%0 - %1,5)

polipropilen fiber katılmasının zeminin mühendislik özeliklerine etkisini araştıran Ayyappan ve diğ., numuneler üzerinde serbest basınç ve CBR deneyleri yapmışlardır. Araştırmacılar, lif katkısının serbest basınç mukavemetini ve sünekliği arttırdığını, lif uzunluğunun artmasıyla birlikte sünekliğin artmaya devam ettiğini ancak basınç dayanımının çok düşük artışlar gösterdiğini veya sabit kaldığını ortaya koymuşlardır. CBR deneyi sonuç verilerine göre zeminin taşıma gücü açısından en iyi performansı gösterdiği lif oranının %1, lif uzunluğunun ise 12 mm olduğunu kaydetmişlerdir [27].

Ateş, cam fiber ve çimento katkısının sıvılaşan zeminlerin kayma dayanımı ve serbest basınç direnci üzerindeki etkisini araştırmıştır. Yapılan çalışmada kuru kum zemine ağırlıkça %1, %2, %3 ve %4 oranında katılan 4 mm uzunluğundaki cam fiber ve %5, %10, %15 ve %20 oranında karıştırılan çimento ile hazırlanan numunelere kesme kutusu ve serbest basınç deneyleri uygulanmıştır. Zemin numunelerinin basınç dayanımında, artan çimento oranıyla birlikte artış gözlendiği ve fiber katkısının zeminin gevrek davranışında azalma meydana getirdiği sonucuna ulaşılmıştır. Ancak %3 fiber oranının aşılması durumunda zeminin mekanik özelliklerinde düşüşün gözlendiği, bu nedenle en uygun lif oranının %3 ve çimento oranının ise %15 olduğu belirtilmiştir. Kesme kutusu deneyinin sonuçları analiz edildiğinde fiber katkısının zeminin içsel sürtünme açısını artırdığı belirtilmiştir [28].

Kohezyonlu zemine Hindistan cevizi ağacından elde edilmiş liflerin karıştırılması sonrasında zeminin basınç ve kayma mukavemetinin yanı sıra CBR oranındaki değişimini de incelemeye yönelik deneysel çalışmalar yapan Qu ve diğ., kil zemine 6 mm, 12 mm ve 18 mm uzunluğunda fiber karıştırmışlardır. Zemin numunelerine karıştırılan lif oranının %0 ile %1 arasında değişiklik gösterdiği çalışmada fiber katkısıyla birlikte zeminin maksimum ve kalıntı kayma direncinde, basınç mukavemetinde ve CBR değerinde artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışma sonucunda, en yüksek dayanımın kaydedildiği optimum fiber oranının ağırlıkça %0,6-%0,8 aralığında ve fiber uzunluğunun 12 mm olduğunu ortaya koymuşlardır [29].

Eskişar ve diğ. doygun kum zemine %0,25, %0,50 ve %1 oranında, 6 mm ve 12 mm uzunluğunda monofilament polipropilen fiber malzeme karıştırarak zeminin sıvılaşma karşısında gösterdiği davranışı araştırmışlardır. Numuneler %50 ve %70 rölatif sıkılıkta hazırlanmış ve drenajsız tekrarlı üç eksenli basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Arazi koşullarını temsil etmesi açısından deney numunelerine 100 kPa'lık hücre basıncı uygulanmıştır. Deney sonuçları değerlendirildiğinde lif oranı ve boyu arttıkça

sıvılaşmanın başlaması için gereken çevrim sayısında artış olduğu gözlenmiştir [30].

Polipropilen lif kullanılarak yapılan bir diğer çalışmada Dayakar ve diğ. kil zemin numuneleri üzerinde uyguladıkları CBR deneyi sonucunda CBR değerlerindeki değişimi araştırmışlardır. Çalışma kapsamında, esnek yol kaplaması ve havalimanı pistleri açısından önemli bir zemin parametresi olan CBR değerinin %0, %0,25, %0,50, %0,75 ve %1 polipropilen katkılı zemindeki değişimi incelenmiştir. Araştırmacılar, numuneleri optimum su muhtevasına göre hazırlayıp CBR deneyini uygulamışlardır. Elde edilen sonuçlar artan oranlardaki fiber katkısının optimum su içeriğinde düşüşe sebep olduğunu ortaya koyarken CBR değerini ise arttırdığını göstermektedir [31].

Gao ve diğ. tarafından bazalt lif katkılı kil zeminin serbest basınç mukavemetindeki değişimler incelenmiştir. Araştırmacılar, 4 mm ile 15 mm arasında değişen uzunluklardaki bazalt lifi, zemine %0,05 ile %0,35 arasında değişen oranlarda ekleyerek numuneler hazırlamışlardır. Bu zemin numuneleri üzerinde yaptıkları basınç deneyleri sonucunda 12 mm uzunluğundaki bazalt lifin, kil zemine %0,25 oranında katılmasının en yüksek basınç dayanımını sağladığı sonucuna ulaşmışlardır [32].

Çimento ve fiber katkılı siltli kum zemin numuneleri üzerinde bir dizi üç eksenli basınç deneyleri uygulayarak zeminin kırılma anındaki davranışlarını ve mukavemet özelliklerini inceleyen Consoli ve diğ., katkısız ve ağırlıkça kuru kumun %1'i oranında çimento katkılı numunelere 7 günlük kür uygulamışlardır. Numunelerdeki fiber oranı ise kuru kum-çimento karışımının ağırlıkça %0 ve %3'ü olup 12,8 mm uzunluğundaki cam elyaf malzeme kullanılmıştır. Deney sonuçları, çimento katkısının pik kayma dayanımını artırmasının yanı sıra zemini daha rijit bir hale getirip gevrek davranış göstermesine yol açtığını, ancak fiber malzemenin zemine eklenmesiyle birlikte pik ve kalıntı kayma direncinde artış olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda fiber katkısının, zeminin rijitliğini azaltarak daha sünek davranmasına sebep olduğu belirtilmiştir. Pik kırılma zarfları incelendiğinde, içsel sürtünme açısının artan fiber oranlarıyla birlikte 35°'den 46°'ye çıktığı gözlenmiştir [33].

Fiber katkılı zemin iyileştirmesiyle ilgili yapılan bir diğer çalışmada Mali ve Singh, siltli zeminlerin dayanımına Hindistan cevizi liflerinin etkisinin olup olmadığını araştırmışlardır. Üç eksenli basınç deneyi düzeneğinde gerçekleştirilen deneylerde fiber katkısıyla birlikte zeminin yanal şekil değiştirmelerinin azaltılması ve mukavemetinin arttırılması hedeflenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde lif takviyesiyle birlikte göçme

anında deviatörik gerilme değerinin katkısız numunede gözlenen değere kıyasla 3,5 katına kadar çıktığı sonucuna ulaşılmıştır. Fiber uzunluğunun, numune çapının ortalama olarak yarısına eşit olduğu durumda zeminin mukavemet özellikleri açısından en iyi performansı sergilediği kaydedilmiştir [34].

Segetin ve diğ. siltli kum zemin ve çimento karışımına öncesinde emaye ile kaplanmış 75 mm ve 80 mm uzunluğundaki keten lifleri %0,6 ve %0,8 oranlarında katarak çimento-zemin karışımının dayanımını artırmayı amaçlamışlardır. Sünekliğin fiber katkısıyla birlikte artış gösterdiğini, ancak bu artışın lif oranından ziyade karışımı oluştururken uygulanan yöntemden kaynaklandığını belirtmişlerdir. 85 mm'nin üstündeki lif uzunluğunda elle karıştırmanın mümkün olmadığını ancak fiber boyundaki artışla birlikte karışımın mukavemet özelliklerinin iyileştiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar, numunelerin gevrek davranış sergilememesi için fiber oranının %0,6'nın aşağısına düşürülmemesi gerektiğinin altını çizerken en iyi lif oranının %0,8 olduğu sonucuna varmışlardır [35].

Ndepete ve Sert; 6 mm, 12 mm ve 24 mm uzunluğundaki bazalt fiberlerin zemine ağırlıkça %1, %1,5 ve %2 oranında eklenmesiyle hazırlamış oldukları siltli zemin numunelerini üç eksenli basınç deneyine tabi tutmuşlardır. Artan lif uzunluğunun kayma direncinde sürekli bir artışa sebep olduğunu ortaya koymakla birlikte, maksimum dayanıma %1,5 fiber oranına sahip numunede erişildiğini belirtmişlerdir [36].

Maher ve Gray, kum zemine farklı özellikte fiberler katarak yaptıkları çalışmada katkılı kum zeminin statik yükler etkisinde gerilme-şekil değiştirme ilişkisini ve zemin davranışını incelemek üzere statik üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Fiber özelliklerinin ve zemin dane dağılımının dayanım değerlerini ve deformasyon anındaki davranışı önemli ölçüde etkilediği sonucuna varan araştırmacılar, ortalama dane boyundaki artışın maksimum gerilme üzerinde etkisinin olmamasına rağmen fiberin dayanım üzerindeki etkisini azalttığını ifade etmişlerdir. Kayma direncinin artan fiber oranıyla birlikte artış gösterdiğini ancak bu artışın limitlerini uygulanan hücre basıncının belirlediğini ortaya koymuşlardır [37].

Zhuang ve Yu, kireç ve bazalt fiber ile güçlendirilmiş şişen zeminlerin mukavemet karakteristiklerini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada %0 ile %8 arasında değişen oranlarda kireç ve bazalt fiber karıştırdıkları şişen kil zemin üzerinde uyguladıkları testler sonucunda artan kireç oranının, zeminin maksimum kuru yoğunluğunda ve plastisite

indisinde düşüşe yol açarken optimum su içeriğini artırdığını ifade etmişlerdir. Sünekliğin bazalt fiber katkısıyla, serbest basınç dayanımının ise kireç katkısıyla artış gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Zeminin mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesinde bazalt liflerin baskın rol oynadığı ve şişme potansiyelinin kireç katkılı numunelerde azaldığı sonucuna ulaşmışlardır [38].

Özdemir ve diğ., katkısız ve kireç katılmış yüksek plastisiteli kil zemine %0,5 ve %1 oranında bazalt elyaf karıştırarak fiber malzemenin zeminin basınç mukavemetine etkisinin zamanla değişimini araştırmışlardır. Deney sonuçları, bazalt fiber katkısının bütün numunelerin basınç dayanımında artışa sebep olduğunu göstermiştir. Test edilen numuneler arasında %9 oranında kireç ve %1 oranında bazalt fiber katkılı numunelerin en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu ve bu dayanıma 28 günlük kür süresi sonunda ulaştığı ortaya konmuştur. Basınç mukavemetindeki maksimum artışa 28 günlük kür süresi sonunda ulaşılması, kil ile kirecin reaksiyona girmesi sonucu ortaya çıkan silikat jelinin zemin içindeki boşlukları doldurmak suretiyle danelerin kenetlenmesini ancak bu süre zarfında sağlamış olduğu sonucuna bağlanmıştır [39].

Yetimoğlu ve Salbaş, polipropilen katkıyla güçlendirilmiş kum zemin numunelerinin kayma dayanımını araştırmak için 45 adet kesme kutusu testi gerçekleştirmişlerdir. %0 ile %1 arasında değişen oranlarda katkı kullanılan numunelerin deney sonuçlarını değerlendiren araştırmacılar, artan lif oranının pik kayma direncine herhangi bir etkisinin olmadığını ancak kalıntı direncinin içsel sürtünme açısında az da olsa bir artışa sebep olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca fiber katkısının zemini daha sünek hale getirdiği sonucuna ulaşmışlardır [40].

Akbulut ve diğ., yüksek plastisiteli kil zemine %1 ile %5 arasında değişen oranlarda atık lastik tozu ile birlikte %0,1 ile %0,5 arasında değişen oranlarda polietilen ve polipropilen fiber karıştırarak zeminin statik ve dinamik özelliklerindeki değişimi incelemek amacıyla kesme kutusu ve serbest basınç deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Lastik tozu ve lif katkılarının zeminin kohezyonunda genellikle artışa sebep olduğu, artan fiber oranıyla birlikte içsel sürtünme açısında ise düzenli seyretmeyen bir artışın gözlendiği ifade edilmiştir. %2 oranında lastik tozu karıştırılmış numunelerin en yüksek serbest basınç dayanımı değerini verdiği deneysel çalışmada, zemine polietilen ve polipropilen elyaf malzemenin %0,2 oranında eklenmesiyle optimum basınç ve kayma dayanımına ulaşıldığı ortaya konmuştur [41].

Ayraçma ve Teymür, kum zemine cam lifi karıştırarak yaptıkları çalışmada kayma mukavemeti parametreleri ve permeabilitenin değişimini araştırmışlardır. Cam fiber katkısının %0,25 ve %0,5 olarak kullanıldığı çalışmada, artan oranlardaki fiber katkısıyla birlikte zeminin kayma dayanımı ve geçirimliliğinde artış gerçekleştiği sonucuna ulaşmışlardır [42].

Consoli ve diğ., yaptıkları çalışmada, ağırlıkça kuru kumun %1, %4, %7 ve %10'u oranında çimento ve %0,5'i oranında polipropilen fiber ekleyerek zemin numunelerinin maksimum kayma direnci ve yenilme sırasında gösterdiği davranışı incelemek amacıyla drenajlı koşullarda olmak üzere üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneylerden elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde çimento katkısının tek başına pik kayma dayanımını ciddi ölçüde arttırdığı ancak malzemenin daha gevrek davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Çimento olmaksızın fiber malzemeyle hazırlanmış numunelerin maksimum kayma mukavemetinde de katkısız numuneye göre artış gözlendiğini, bununla birlikte malzemenin pekleşme davranışı sergilediğini belirtmişlerdir. Çimentonun ve lif katkısının birlikte karıştırıldığı zeminlerde ise zeminin mukavemetinin yine arttığı fakat sadece çimento katkısının bulunduğu zemin numunelerine kıyasla sünek davranış gösterdiği anlaşılmıştır. Kohezyon kuvvetindeki değişim incelendiğinde, çimento oranının %7 olduğu noktaya kadar fiber katkısının kohezyonu artırmaya devam ettiği, ancak bu noktadan sonra çimentolu karışıma eklenen fiberin kohezyonda azalmaya sebep olduğu ortaya konmuştur. İçsel sürtünme açısı, %7 oranına kadar çimento katkılı numunelerde yaklaşık 46° olarak hesaplanmışken, artan çimento oranıyla 51°'ye kadar çıkmıştır [43].

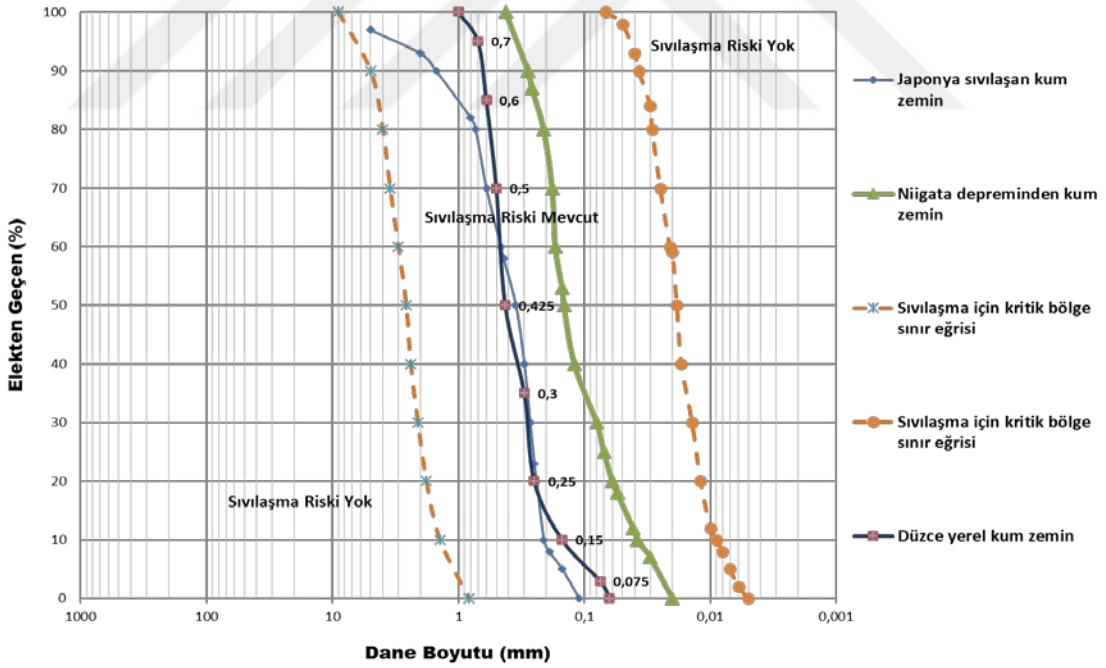
Bazalt fiber katkısının organik zeminler üzerindeki etkisine yönelik yaptıkları çalışmada Gisymol ve Ramya, ağırlıkça %0,05, %0,10 ve %0,15 oranında; 10 mm, 20 mm ve 30 mm uzunluğundaki bazalt fiberleri, yüksek plastisiteli organik zeminle karıştırmışlardır. Hazırlamış oldukları numuneleri kompaksiyon ve serbest basınç deneylerine tabi tutan araştırmacılar, maksimum kuru birim hacim ağırlığının 14,6 kN/m^3 ile en yüksek değere ulaştığı numunedeki lif oranının %0,15, lif uzunluğunun 30 mm ve optimum su muhtevasının %26 olduğunu kaydetmişlerdir. 28 gün sonundaki basınç dayanımları incelendiğinde ise 10 mm uzunluğundaki bazalt fiberlerin %0,05 oranında bulunduğu numunelerin en iyi mukavemet özelliklerini gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır [44].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. MATERYAL

3.1.1. Kum Zemin

Deneysel çalışmada, Düzce ili Gölyaka yerleşim yeri sınırları içinden elde edilen kum zemin numuneleri kullanılmıştır. Kum zemin numunesi üzerinde ASTM D2487 standardına uygun gerçekleştirilen elek analizi sonucunda, çalışmada kullanılan kum zeminin dane çapı dağılım eğrisi ve zemin sınıfı belirlenmiştir [45]. Şekil 3.1'de gösterilmekte olan, Düzce yerel kum zemine ait dane çapı dağılım eğrisi incelendiğinde, zeminin granülometri eğrisinin, Tsuchida'nın depremlerde sıvılaşan zeminler üzerine yaptığı çalışmalar sonucu ortaya koyduğu, sıvılaşma potansiyeline sahip zeminlerin dane boyutu sınır eğrileri arasında kaldığı gözlenmiştir [28], [46].



Şekil 3.1. Dane çapı dağılım eğrisi ve sıvılaşma sınır eğrileri.

Kum zemine ait görseller Şekil 3.2'de sunulmuş olup kum zeminin fiziksel özellikleri ve zemin sınıfına ait bilgiler Çizelge 3.1'de belirtilmiştir.



Şekil 3.2. Kum zemin.

Çizelge 3.1. Kum zemine ait fiziksel özellikler ve zemin sınıfı.

Özellik	**Değer**
Özgül Ağırlık, G_s	2,73
Maksimum Boşluk Oranı, (e_{mak}) (%)	96,1
Minimum Boşluk Oranı, (e_{min}) (%)	62,7
Rölatif Sıkılık, D_r *(%)*	44
Boşluk Oranı, *e (%)*	81,4
Likit Limit, *LL (%)*	29,7
Uniformluk Katsayısı, C_u	3,2
Eğrilik Katsayısı, C_c	1,1
Zemin Sınıfı (USCS)	SP

3.1.2. Çimento

Üretimi OYAK Bolu Çimento fabrikasında TS EN 197-1 standardına uygun olarak yapılan ve Şekil 3.3'te görseli bulunan CEM I 42,5 R Portland çimentosunun kullanıldığı bu çalışmada çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik analizine dair üretici firmadan temin edilen bilgiler Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.3. CEM I 42,5 R Portland çimentosu.

Çizelge 3.2. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik analizi.

Kimyasal Bileşenler	**(%)**	**Fiziksel Özellikler**	
SiO_2	19,45	Priz başlangıcı (dk)	200
Al_2O_3	5,41	Priz sonu (dk)	260
Fe_2O_3	3,48	Hacim genleşmesi (mm)	1,5
CaO	64,13	Yoğunluk (g/cm^3)	3,14
MgO	1,50	Blaine inceliği (cm^2/g)	4230
SO_3	3,05	**Mekanik Özellikler**	
K_2O	1,10	Basınç dayanımı (MPa)	
Kızdırma kaybı	1,69	2 gün	27,5
Çözünmeyen kalıntı	0,63	7 gün	45,6
Serbest CaO	0,74	28 gün	54,1

3.1.3. Bazalt Fiber

Volkanik kayaç türlerinden biri olan bazalt, lavların yeryüzüne ulaştığında soğuması ve sertleşmesiyle hammadde özelliğini kazanmaktadır. Yerkabuğunda yaygın olarak rastlanan bazalt kayaçları siyah renkte olup dayanıklı bir yapıya sahiptir [47]. Termoplastik özelliğe sahip olmasının yanı sıra ana bileşeni SiO_2 olan bazaltın kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.3'te belirtilmiştir [48], [49].

Çizelge 3.3. Bazaltın kimyasal bileşenleri.

Bileşen	**Miktar (Ağırlıkça %)**
SiO_2	42,4 - 55,6
Al_2O_3	14,2 - 17,9
Fe_2O_3	10,8 - 11,6
CaO	7,4 - 8,8
MgO	4,1 - 9,4
Na_2O	2,3 - 3,7
TiO_2	1,1 - 2,5
K_2O	1,0 - 2,3

Üretimi esnasında başka bir katkı maddesine ihtiyaç duyulmayan ve bu özelliğiyle düşük üretim maliyetine sahip olan bazalt fiberler, 1300-1700^oC sıcaklıkta eritilen bazaltın ince parçalara ayrılarak lif haline getirilmesi yöntemiyle elde edilmektedir [48].

Çalışma kapsamında, makara halinde bulunan sürekli bazalt fiberin kırpılmasıyla elde edilen 6 mm uzunluğunda, 0,7 mm genişliğinde ve 0,2 mm kalınlığında bazalt lifler kullanılmış olup malzemeye ilişkin görseller Şekil 3.4'te sunulmuştur.



a) b) c)

Şekil 3.4. Bazalt lif formları a) Sürekli bazalt fiber b) Bazalt lif c) Kırpılmış bazalt fiber.

Tez çalışmasında kullanılan bazalt liflerin üretici firmadan alınmış olan mekanik ve fiziksel özellikleri ise Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Bazalt fiberin mekanik ve fiziksel özellikleri.

Özellik	**Değer**
Çap *(µm)*	13-20
Elastisite Modülü *(GPa)*	88
Çekme Dayanımı *(MPa)*	4000-4500
Yoğunluk *(g/cm^3)*	2,67
Uzama *(%)*	3,15

3.1.4. Su

Çalışmada Düzce içme suyu şebekesinden temin edilen su kullanılmıştır.

3.2. YÖNTEM

Deneysel çalışmada öncelikle doğal kum zemin Düzce ili Gölyaka yerleşim yeri sınırları içinden temin edilerek laboratuvar ortamına getirilmiştir. Laboratuvar ortamına getirilen doğal zeminin fiziksel özelliklerini ve zemin sınıfını tayin etmek üzere elek analizi, özgül ağırlık, likit limit ve kompaksiyon deneyi yapılmıştır. Elek analizi deneyi; doğal kum zemin 10, 18, 40, 60, 100 ve 200 numaralı eleklerden elenerek gerçekleştirilmiş ve zeminin dane çapı dağılım eğrisi oluşturulmuştur. Kompaksiyon deneyinden elde edilen

verilerle ise doğal zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası tespit edilmiştir. Zeminin likit limitini belirlemek üzere Casagrande likit limit deneyi uygulanmış ancak plastik limiti belirlemek mümkün olmamıştır. Son olarak zeminin özgül ağırlığı piknometre deneyi ile tespit edilmiştir.

Doğal zeminin fiziksel özellikleri ve zemin sınıfı belirlendikten sonra katkısız ile ağırlıkça %2,5, %5 ve %10 oranlarında çimento; %1, %2, %3 ve %4 oranlarında bazalt fiber katkılı olmak üzere toplamda 20 seri kum zemin numunesine, her serinin maksimum kuru birim hacim ağırlığını ve optimum su muhtevasını belirlemek amacıyla kompaksiyon deneyi uygulanmıştır. Kompaksiyon deneyleri sonucunda belirlenen optimum su içeriğinde hazırlanan numuneler üzerinde, karışımların maksimum kayma dayanımı ve kayma mukavemeti parametrelerini bulmak üzere kesme kutusu deneyi, serbest basınç dayanımlarını elde etmek için serbest basınç deneyi ve taşıma oranlarını tespit etmek için ise CBR deneyi gerçekleştirilmiştir. CBR deneyi her bir seriden 2 tane olmak üzere toplam 40 adet numune, kesme kutusu deneyi her seriden 3 tane olmak üzere toplam 60 adet numune üzerinde uygulanmıştır. Serbest basınç deneyinde ise 14 ve 28 günlük kür süreleri de dikkate alınarak her seriden 6 tane olmak kaydıyla toplam 120 adet numune test edilmiştir. Numune serileri ve serilerdeki malzemelerin ağırlıkça karışım oranları Çizelge 3.5'te belirtilmiştir.

Çizelge 3.5. Numune serileri ve serilerdeki malzemelerin karışım oranları.

Numune Serisi	**Çimento / Kum (%)**	**Bazalt Fiber / Kum (%)**	**Su (%)**
0C0F	0	0	15,4
0C1F	0	1	15,4
0C2F	0	2	15,2
0C3F	0	3	14,9
0C4F	0	4	15,1
2,5C0F	2,5	0	15,5
2,5C1F	2,5	1	15,3
2,5C2F	2,5	2	14,6
2,5C3F	2,5	3	14,6
2,5C4F	2,5	4	14,0
5C0F	5	0	15,0
5C1F	5	1	14,4
5C2F	5	2	14,3

Çizelge 3.5 (devam). Numune serileri ve serilerdeki malzemelerin karışım oranları.

5C3F	5	3	14,8
5C4F	5	4	13,8
10C0F	10	0	14,1
10C1F	10	1	14,8
10C2F	10	2	14,4
10C3F	10	3	13,7
10C4F	10	4	13,9

3.2.1. Kompaksiyon Deneyi

Sıkıştırma enerjisi uygulamak suretiyle zemin boşluklarındaki havanın dışarı çıkmasını sağlayarak zemin danelerinin birbiriyle daha sıkı bir düzen oluşturması ve toplam zemin hacmini azaltarak zeminin kuru yoğunluğunun artırılması amacıyla yapılan işleme kompaksiyon denilmektedir [50].

ASTM D558 standardına uygun olarak gerçekleştirilen kompaksiyon deneyinde, her seri için 2 kg kuru kum kullanılarak hazırlanan karışımlar; 10,16 cm çapında, 944 cm^3 hacmindeki metal silindirik kalıp içine üç tabaka halinde yerleştirilerek kompaksiyon cihazıyla sıkıştırılmıştır. Her tabaka yerleştirildikten sonra 2,5 kg'lık tokmak yaklaşık 30 cm yükseklikten 25 kez düşürülmüştür [51]. Bu uygulama, karışımdaki su miktarı artırılarak, her seri için kompaksiyon eğrisini oluşturabilecek veriler elde edilene dek tekrarlanmıştır. Kompaksiyon işlemi sonunda numunelerin yaş birim hacim ağırlıkları hesaplanmış ve numunelerden bir miktar alınıp tartıldıktan sonra 105°C sıcaklıktaki etüve bırakılmıştır. Etüvde 24 saat bekletildikten sonra çıkartılarak numunelerin su içerikleri tespit edilmiştir. Denklem (3.1) kullanılarak her serinin kuru birim hacim ağırlıkları hesaplanmış ve kuru birim hacim ağırlığı-su muhtevası grafiği oluşturulmuştur. Bu grafik yardımıyla her seri için maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası değerleri belirlenmiştir. Kompaksiyon deneyinin uygulanması sırasındaki görsellere Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de yer verilmiştir.

$$\gamma_k = \frac{\gamma_n}{1 + w} \tag{3.1}$$

Denklemde;

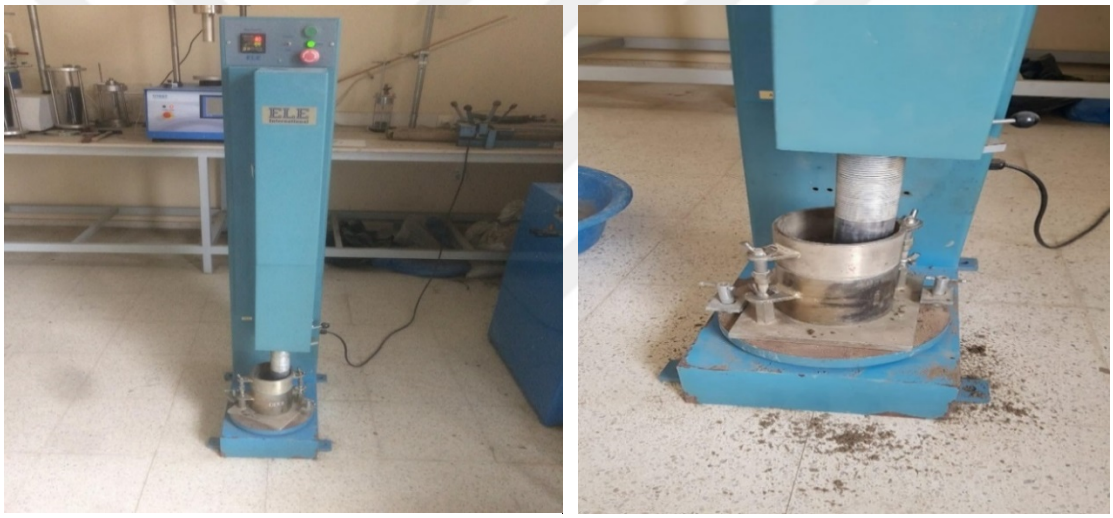
γ_k: Kuru birim hacim ağırlığı (kN/m^3)

γ_n: Yaş birim hacim ağırlığı (kN/m^3)

w: Su muhtevası (%)



Şekil 3.5. Kompaksiyon deneyi için hazırlanmış karışım ve Proktor kalıbı.



Şekil 3.6. Kompaksiyon cihazı ve sıkıştırma işlemi.



Şekil 3.7. Numunenin üst yüzeyinin spatula yardımıyla düzlenmesi ve etüve bırakılmak için alınan örnekler.

3.2.2. CBR Deneyi

İlk olarak Kaliforniya'da, Karayolları Araştırma Dairesi tarafından karayolu altyapılarında kullanılacak zeminlerin taşıma kapasitesinin belirlenmesi amacıyla 1929 yılında geliştirilen CBR deneyi [52], özellikle havaalanı ve yol kaplamalarının dayanımının belirlenmesinde uygulanmaktadır.

CBR, zemin içerisine 1,27 mm/dk hızla batırılan 49,63 mm çapındaki pistona karşı zeminin belirli bir penetrasyon derinliğinde göstermiş olduğu direncin, aynı batma derinliğinde standart bir kırma taş numunenin direncine oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu oran hesaplanırken gerilme yerine yük değerleri de kullanılabilmektedir. CBR, herhangi bir batma derinliği için ölçülen yükün standart bir yüke oranı olarak tanımlanmış olsa da 2,5 mm'lik ve 5 mm'lik batma derinliği baz alınarak hesaplanmaktadır. Projelendirme aşamasında ise normalde 2,5 mm batmadaki CBR değeri dikkate alınmaktadır. 5 mm'lik batma derinliğindeki CBR değerinin 2.5 mm batmadaki CBR değerinden yüksek çıkması durumunda deney tekrar yapılmalıdır. Ancak, deney tekrarlanmasına rağmen 5 mm'lik penetrasyondaki CBR değeri 2,5 mm'deki değerden yine daha büyük çıkıyorsa, büyük olan CBR değeri dikkate alınır [53].

ASTM D1883 standardına bağlı kalınarak gerçekleştirilen CBR deneyinde; numuneler, her numune için 4 kg kuru kum kullanılarak 15,2 cm çapa sahip, 2124 cm^3 hacimli metal silindirik kalıplarda optimum su içeriğinde sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Her bir seri için iki adet numune hazırlanmıştır. Zeminin arazide maruz kalacağı yükü temsilen numunelerin her birinin üzerine 2,27 kg'lık iki adet diskten oluşan toplam 4,54 kg sürşarj yükü yerleştirilmiş ve numuneler içi su dolu kür havuzuna bırakılmıştır. Kür havuzunda 96 saat bekletildikten sonra çıkarılan numuneler üzerinde CBR deneyi uygulanmıştır. Deney sonucunda, pistonun zemin içerisine 0,625 mm, 1,250 mm, 1,875 mm, 2,50 mm, 3,50 mm, 5,0 mm ve 7,50 mm batabilmesi için uygulanmış olan yükler ayrı ayrı kaydedilerek yük-penetrasyon grafikleri oluşturulmuş ve Denklem (3.2)'ye göre her bir numunenin 2,5 mm ve 5 mm batma derinliğindeki CBR değeri hesaplanmıştır.

$$CBR\ (\%) = \frac{Düzeltilmiş\ Yük}{Standart\ Yük} \times 100 \tag{3.2}$$

Kırma taş ile yapılmış deney sonucunda batma derinliklerine göre belirlenmiş standart gerilmelere ve standart yüklere Çizelge 3.6'da yer verilmiştir.

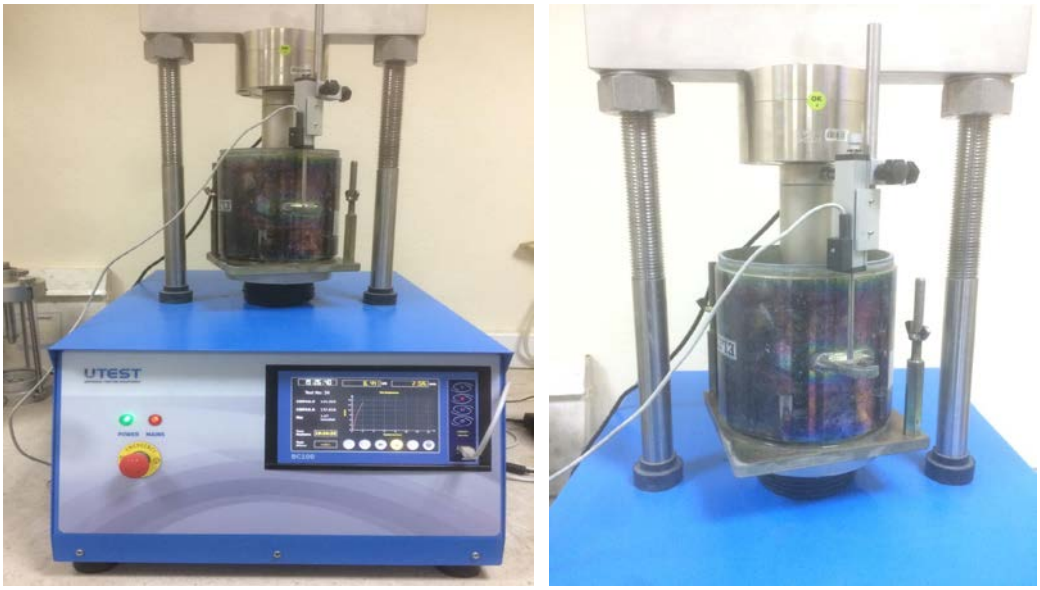
Çizelge 3.6. CBR hesaplarında kullanılan standart gerilmeler ve standart yükler [52].

Penetrasyon Derinliği (mm)	Standart Gerilme (kg/cm^2)	Standart Yük (kgf)
2,54	70,4	1362,6
5,08	105,6	2043,9
7,62	133,7	2587,7
10,16	161,9	3133,5
12,70	183,0	3541,9

Numunelerin kür havuzunda bekletilmesine ilişkin görseller Şekil 3.8'de sunulmuş olup, Şekil 3.9'da ise numunenin CBR deney cihazında test edilme anı görülmektedir.



Şekil 3.8. Kür havuzunda bekletilen numuneler.

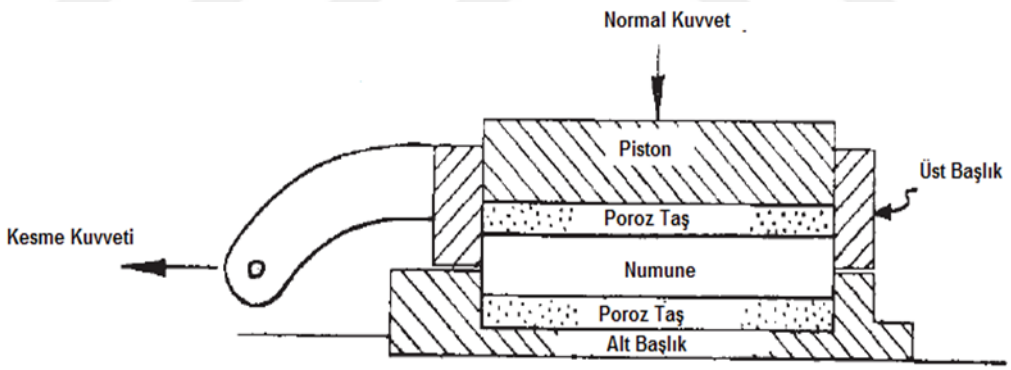


Şekil 3.9. Numunenin CBR deney cihazında test edilmesi.

3.2.3. Kesme Kutusu Deneyi

Kesme kutusu deneyi kayma mukavemeti parametreleri olan kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısının (ϕ) ölçümünde kullanılan ilk metot olmakla birlikte direkt kesme deneyinin ilk denemesi 1776 yılında Coulomb tarafından gerçekleştirilmiştir [54]. Zeminlerin kayma dayanımının ölçülmesine yönelik ilk çalışma ise 1846'da Fransız mühendis Alexandre Collin tarafından yapılmıştır. Günümüzde kullanılan kesme kutusu deney aleti ise 1932 yılında Casagrande tarafından tasarlanmıştır [55].

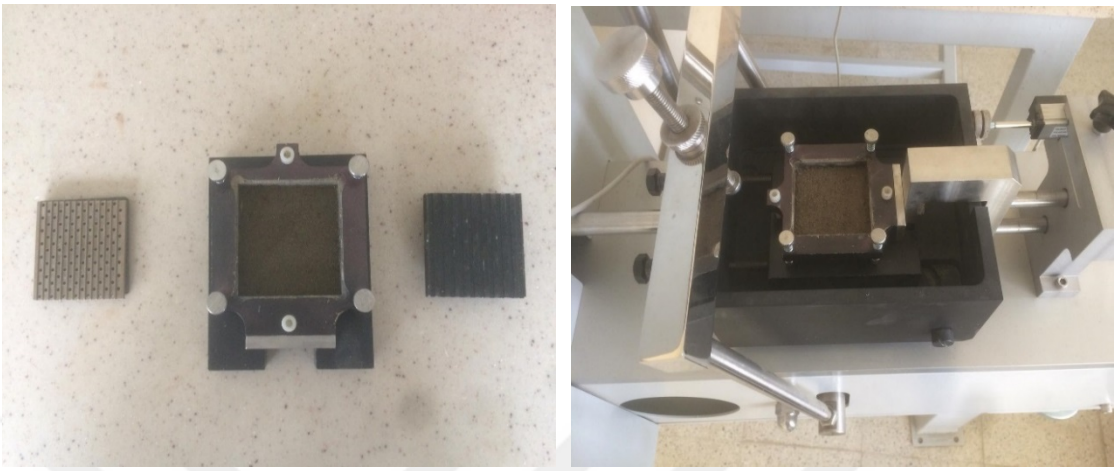
Kesme kutusu deneyi, numunenin dairesel veya kare kesit alanına sahip metal bir kutuya yerleştirilerek, üzerine sabit bir normal (eksenel) kuvvet etki ettirilmesi sonrasında numuneye gittikçe artan kesme kuvveti uygulanması prensibine dayanmaktadır. Kesme kutusunun, yatay eksende birbirinden ayrılabilen mekanizmaya sahip başlıklarından birinin, uygulanan kesme kuvveti yönünde hareket etmesi neticesinde oluşan kayma düzlemindeki kayma gerilmeleri hesaplanır [56]. Numuneye, kırılma zarfının çizilmesine olanak sağlayacak sayıda farklı normal kuvvetin uygulanarak, her bir normal gerilmeye karşılık gelen maksimum kayma gerilmesinin hesaplanması gerekmektedir. Kesme kutusu deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3.10'da sunulmuştur.



Şekil 3.10. Kesme kutusu deney düzeneğinin şematik gösterimi.

ASTM D3080 standardına uygun olarak yapılan kesme kutusu deneyi kapsamında, her numune için 150 gram kuru kum kullanılarak optimum su muhtevasında karışım hazırlanmıştır. Deney, her bir seri için üç adet numune üzerinde yapılmıştır. Numuneler, karışımın 6x6x2,5 (cm) boyutlarındaki kare kesitli kesme kutusuna, yine kare kesitli metal bir tokmakla sıkıştırılıp yerleştirilmesi suretiyle hazırlanmıştır. Numuneler hazırlanırken; yüzeyinde delikler bulunan, tek tarafı nervürlü metal bir aparat, nervürlü yüzeyi numuneyle temas edecek ve nervürleri kesme kuvveti yönüne dik olacak şekilde

numunelerin altına ve üstüne yerleştirilmiştir. Poroz taş ise kesme kutusuna, bu metal aparatların yüzeyine temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Kesme kutusuna ve deney düzeneğine yerleştirilmiş numune Şekil 3.11'de görülmektedir.



Şekil 3.11. Kesme kutusuna ve deney düzeneğine yerleştirilmiş numune.

Çimento katkılı numuneler, çimentonun prizini tam alması, aynı zamanda numunenin de nem içeriğini kaybetmemesi için kapalı kaplarda 4 saat bekletilmiştir. Bekleme süresi sonunda ilk numuneye 100 N, ikinci numuneye 200 N ve son numuneye ise 300 N'luk eksenel kuvvet uygulanmıştır. Numuneler, normal kuvvetin etkisi altındayken, yükleme hızı 0,250 mm/dk olacak şekilde kesme kuvvetine maruz bırakılmış ve uygulanan her bir eksenel yükleme için kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği oluşturularak maksimum kayma gerilmesi değeri kaydedilmiştir. Son olarak, eksenel yük ve kesme kuvveti uygulanmış serilerin kırılma zarfları çizilerek Denklem (3.3) yardımıyla her seriye ait kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) hesaplanmıştır.

$$\tau = c + \sigma \times \tan\phi \qquad (3.3)$$

Denklemde;

τ: Kayma gerilmesi (kPa)

c: Kohezyon (kPa)

σ: Normal (eksenel) gerilme (kPa)

ϕ: İçsel sürtünme açısı (°)

Kesme kutusu deneyinin uygulanmasına ilişkin görsele Şekil 3.12'de yer verilmiştir.



Şekil 3.12. Kesme kutusu deneyinin uygulanması.

3.2.4. Serbest Basınç Deneyi

Serbest basınç deneyi, silindirik zemin numunesine sadece eksenel yük uygulanması ve numunenin kırılma anına dek artırılan eksenel yük ile birlikte numunenin maksimum gerilme değerinin tespit edilmesi prensibine dayanmaktadır. Kırılma anındaki gerilme hesaplanarak zeminin serbest basınç dayanımı belirlenmekteyken, numunedeki boy kısalmasının ölçülmesiyle birlikte gerilme-deformasyon eğrisi elde edilmektedir.

Serbest basınç deneyinde, numunenin kayma düzleminde oluşabilecek kompleks gerilme davranışlarını azaltmak amacıyla silindirik numunenin yüksekliğinin çapına oranının ikiye eşit veya ikiden büyük olması ($h/d \geq 2$) önerilmektedir. ASTM D1633 standardına bakıldığında zemin-çimento karışımlarının basınç dayanımını ölçmek amacıyla 10,16 cm çapında ve 11,64 cm yüksekliğinde hazırlanmış numuneler de kullanılabilmektedir. Ancak, bu durumda, deney sonuçlarından elde edilen basınç dayanımı değerleri normalden büyük çıkmakta ve bu değerler, gerçek basınç dayanımı değerlerini tespit edebilmek için dönüştürücü faktörüne, yani "1,10"a bölünerek azaltılmaktadır [57].

ASTM D1633 standardına uygun gerçekleştirilen basınç deneyinde; numuneler, her numune için 2 kg kuru kum kullanılarak 10,16 cm çapında, 11,64 cm yüksekliğine sahip, 944 cm^3 hacimli metal silindirik kalıplarda optimum su içeriğinde sıkıştırılarak hazırlanmıştır. 14 ve 28 günlük basınç dayanımlarını ölçmek üzere her seri için 6 adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler, numune çıkarıcı (extruder) sayesinde kalıptan çıkarıldıktan sonra 14 gün ve 28 gün boyunca içeriğindeki nem miktarını

kaybetmemesi için özel olarak yaptırılmış kabinlerde bekletilmiştir. Basınç deneyi numunelerine ilişkin görsel Şekil 3.13'te sunulmuştur.



Şekil 3.13. Basınç deneyi numuneleri.

14 gün ve 28 günün sonunda Şekil 3.14'te görseli bulunan basınç deneyi düzeneğinde basınç dayanımlarını test etmek üzere her numuneye 1,0 mm/dk hızla eksenel yük uygulanmış ve her seri için üç adet numunenin kırılma anındaki basınç dayanımı değerleri kaydedilerek ortalama basınç dayanımları hesaplanmıştır. Hesaplanan ortalama basınç dayanımı değerleri, dönüştürücü faktörü olan "1,10"a bölünerek gerçek ortalama basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir.



Şekil 3.14. Basınç dayanımını ölçmede kullanılan deney düzeneği.

Numunelerin basınç dayanımları Denklem (3.4) kullanılarak hesaplanmış olup farklı çimento ve lif oranına sahip üç adet numunenin deney sonrasındaki görünümlerine ilişkin görseller Şekil 3.15'te sunulmuştur.

$$\sigma = \frac{P_{mak}}{A} \tag{3.4}$$

Denklemde;

σ: Basınç dayanımı (kPa)

P_{mak}: Kırılma yükü (kN)

A: Numunenin kesit alanı (m^2)



Şekil 3.15. Numunelerin serbest basınç deneyi sonrası görünümü.

4. BULGULAR

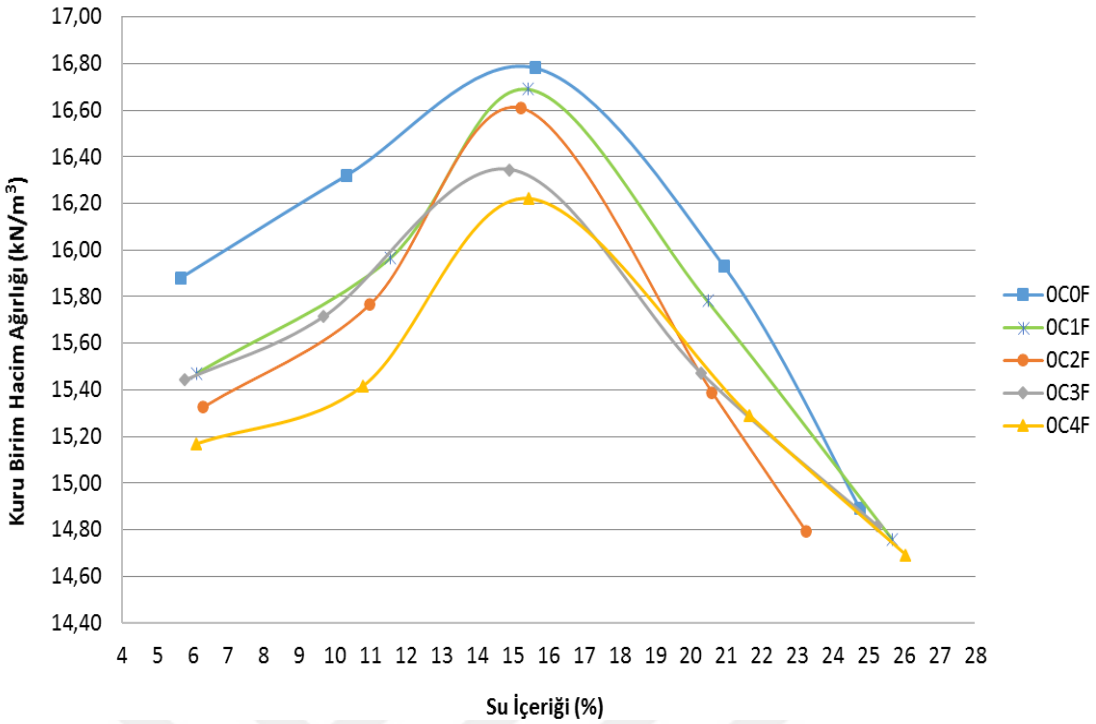
Tez çalışmasının bu bölümünde, Düzce ili Gölyaka yerleşim yeri sınırları içinden temin edilerek laboratuvar ortamına getirilen doğal kum zemine, bazalt fiber ve çimento katkısı eklenerek hazırlanan numuneler üzerinde Düzce Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği laboratuvarında ilgili standartlara uygun olarak gerçekleştirilen kompaksiyon, CBR, serbest basınç ve kesme kutusu deneyleri sonucunda elde edilen bulgulara yer verilmiştir.

4.1. KOMPAKSİYON DENEYİ SONUÇLARI

%0 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelere ait maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası değerleri Çizelge 4.1'de verilmekte olup bu serilere ait kompaksiyon eğrileri Şekil 4.1'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. %0 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kompaksiyon deneyi sonuçları.

Numune Serisi	**Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı ($\gamma_{k,mak}$) (kN/m^3)**	**Optimum Su Muhtevası (w_{opt}) (%)**
0C0F	16,78	15,4
0C1F	16,72	15,3
0C2F	16,64	15,0
0C3F	16,38	14,8
0C4F	16,22	15,1

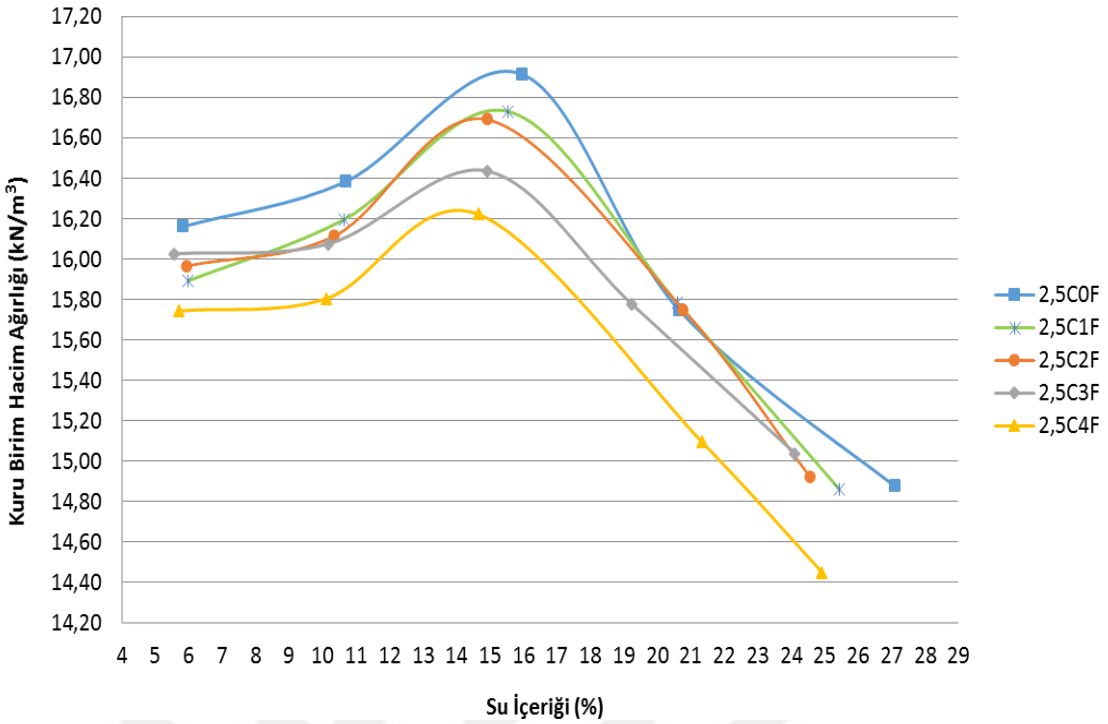


Şekil 4.1. %0 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kompaksiyon grafiği.

%2,5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelere ait maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası değerleri Çizelge 4.2'de verilmekte olup bu serilere ait kompaksiyon eğrileri Şekil 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.2. %2,5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kompaksiyon deneyi sonuçları.

Numune Serisi	**Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı ($\gamma_{k,mak}$) (kN/m³)**	**Optimum Su Muhtevası (w_{opt}) (%)**
2,5C0F	16,96	15,2
2,5C1F	16,77	15,1
2,5C2F	16,72	14,6
2,5C3F	16,49	14,5
2,5C4F	16,27	14,0

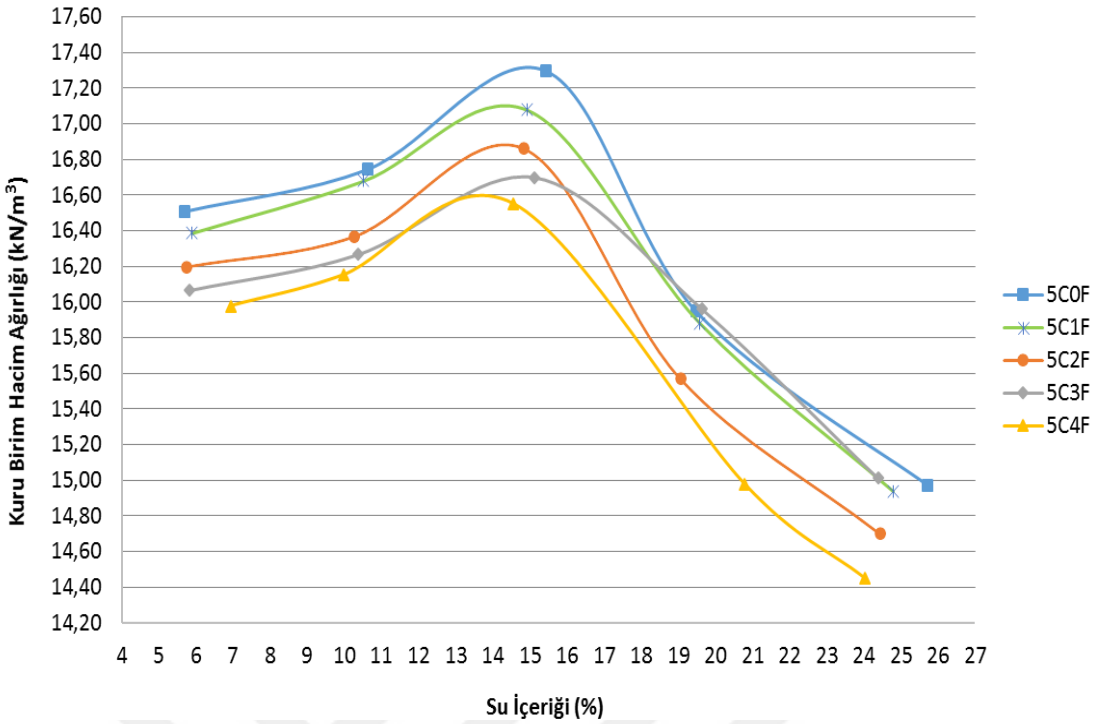


Şekil 4.2. %2,5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kompaksiyon grafiği.

%5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelere ait maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası değerleri Çizelge 4.3'te verilmekte olup bu serilere ait kompaksiyon eğrileri Şekil 4.3'te sunulmuştur.

Çizelge 4.3. %5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kompaksiyon deneyi sonuçları.

Numune Serisi	**Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı ($\gamma_{k,mak}$) (kN/m³)**	**Optimum Su Muhtevası (w_{opt}) (%)**
5C0F	17,35	15,0
5C1F	17,14	14,5
5C2F	16,91	14,3
5C3F	16,74	14,8
5C4F	16,62	13,8

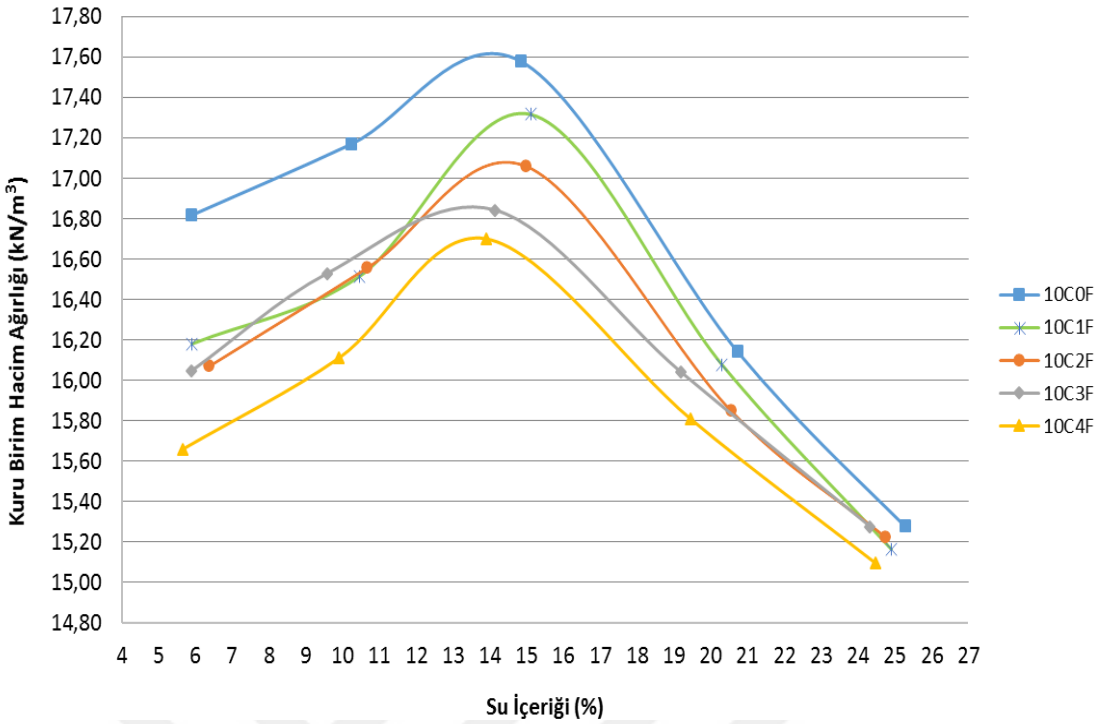


Şekil 4.3. %5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kompaksiyon grafiği.

%10 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelere ait maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası değerleri Çizelge 4.4'te verilmekte olup bu serilere ait kompaksiyon eğrileri Şekil 4.4'te sunulmuştur.

Çizelge 4.4. %10 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kompaksiyon deneyi sonuçları.

Numune Serisi	**Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı ($\gamma_{k,mak}$) (kN/m³)**	**Optimum Su Muhtevası (w_{opt}) (%)**
10C0F	17,64	14,1
10C1F	17,33	14,5
10C2F	17,10	14,2
10C3F	16,84	13,7
10C4F	16,73	13,6



Şekil 4.4. %10 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kompaksiyon grafiği.

Kompaksiyon deney sonuçları incelendiğinde artan çimento oranıyla birlikte tüm serilerdeki zemin numunelerinin maksimum kuru birim hacim ağırlığında artış gözlenirken, numunelerin fiber oranındaki artışın ise maksimum kuru birim hacim ağırlığında azalmaya sebep olduğu görülmektedir. Ancak hem çimento oranındaki hem de fiber oranındaki artışın numunelerin optimum su muhtevasında genel olarak azalmaya sebep olduğu görülmektedir. Tüm seriler birlikte değerlendirildiğinde; maksimum kuru birim hacim ağırlığındaki artış oranının yaklaşık %9 seviyesinde olduğu, optimum su muhtevasındaki maksimum ve minimum değerlere göre ise su ihtiyacında %12 oranında bir azalmanın gerçekleştiği gözlenmiştir.

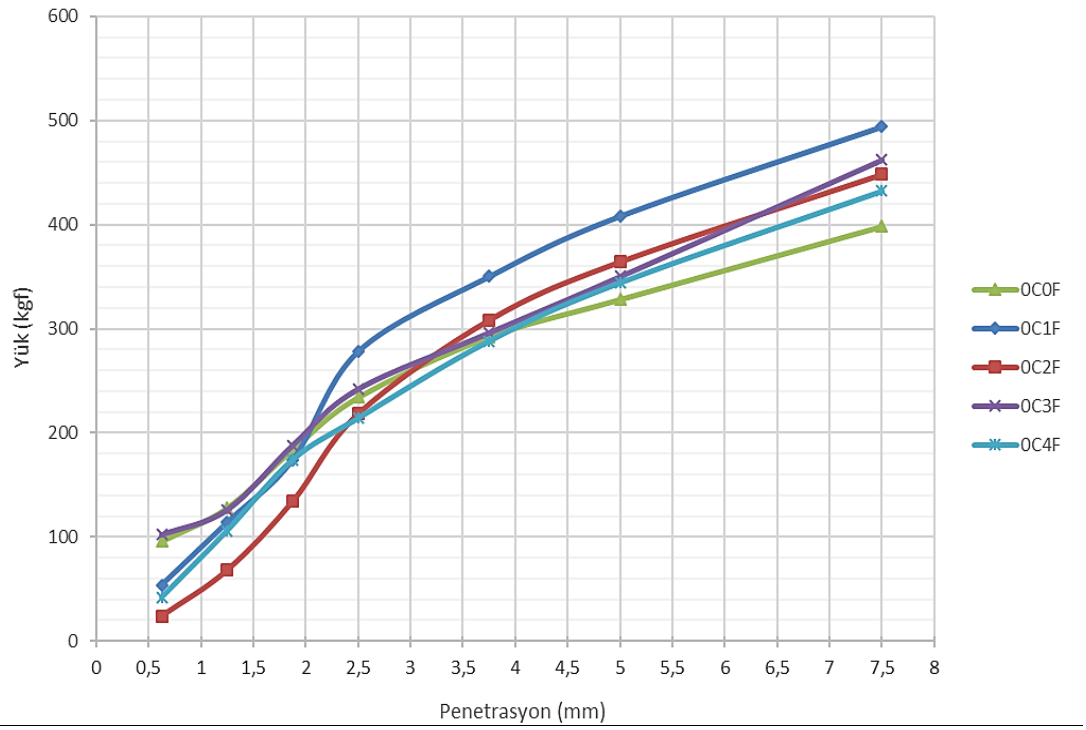
Maksimum kuru birim hacim ağırlığı 17,64 kN/m^3 ile en yüksek değerine bazalt fiber katkısının olmadığı %10 çimento katkılı numunede ulaşırken, çimento katkısının olmadığı %4 fiber katkılı numunenin maksimum kuru birim hacim ağırlığının 16,22 kN/m^3 ile en düşük değere sahip olduğu görülmektedir. Optimum su muhtevasının en yüksek değeri %15,4 olarak katkısız numunede tespit edilirken, en düşük değeri ise %10 çimento ve %4 fiber katkılı numunede %13,6 olarak gözlenmiştir.

4.2. CBR DENEYİ SONUÇLARI

%0 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelere ait CBR deneyi sonuçları Çizelge 4.5'te verilmekte olup bu serilere ait yük-penetrasyon grafiği Şekil 4.5'te sunulmuştur.

Çizelge 4.5. %0 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin CBR deneyi sonuçları.

Numune Serisi	Penetrasyon (mm)						CBR (%)
	2,5 mm			5 mm			
	Standart Yük (kgf)	Düzeltilmiş Yük (kgf)	CBR (%)	Standart Yük (kgf)	Düzeltilmiş Yük (kgf)	CBR (%)	
0C0F	1360	234,18	17,22	2040	328,25	16,09	17,22
0C1F	1360	278,21	20,46	2040	408,31	20,02	20,46
0C2F	1360	218,17	16,04	2040	364,28	17,86	17,86
0C3F	1360	242,18	17,81	2040	350,27	17,17	17,81
0C4F	1360	214,16	15,75	2040	344,26	16,88	16,88

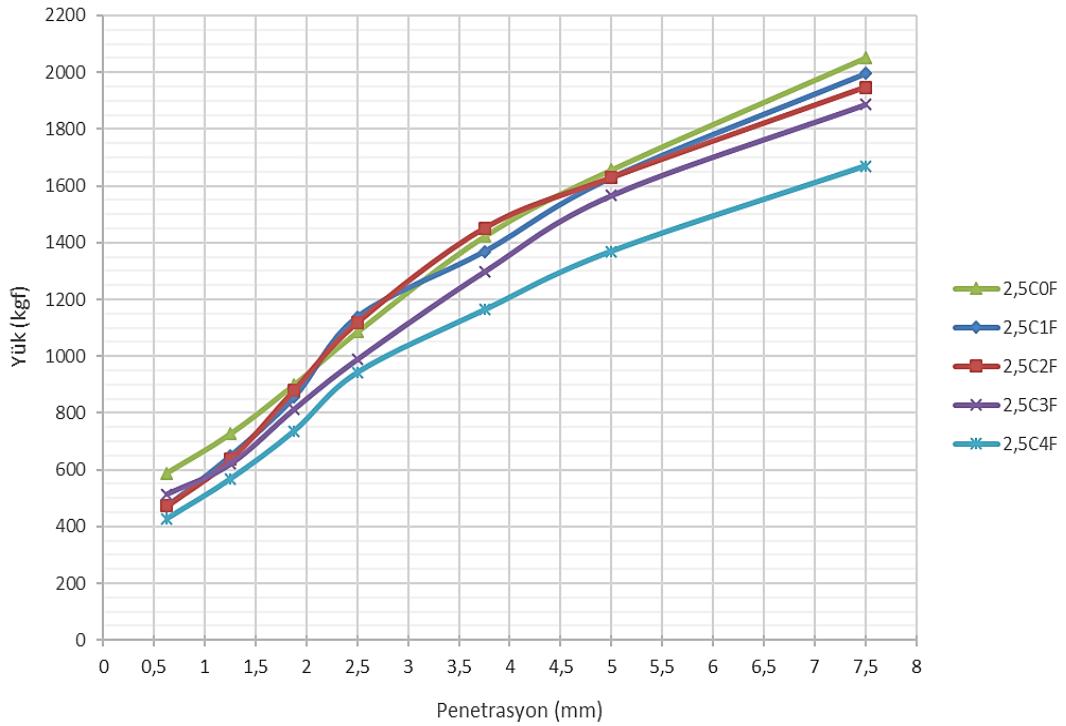


Şekil 4.5. %0 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin yük-penetrasyon grafiği.

%2,5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelere ait CBR deneyi sonuçları Çizelge 4.6'da verilmekte olup bu serilere ait yük-penetrasyon grafiği Şekil 4.6'da sunulmuştur.

Çizelge 4.6. %2,5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin CBR deneyi sonuçları.

Numune Serisi	Penetrasyon (mm)						CBR (%)
	2,5 mm			5 mm			
	Standart Yük (kgf)	Düzeltilmiş Yük (kgf)	CBR (%)	Standart Yük (kgf)	Düzeltilmiş Yük (kgf)	CBR (%)	
2,5C0F	1360	1084,83	79,77	2040	1655,26	81,14	81,14
2,5C1F	1360	1138,87	83,74	2040	1629,24	79,86	83,74
2,5C2F	1360	1118,85	82,27	2040	1629,24	79,86	82,27
2,5C3F	1360	988,75	72,70	2040	1565,19	76,73	76,73
2,5C4F	1360	942,72	69,32	2040	1369,04	67,11	69,32



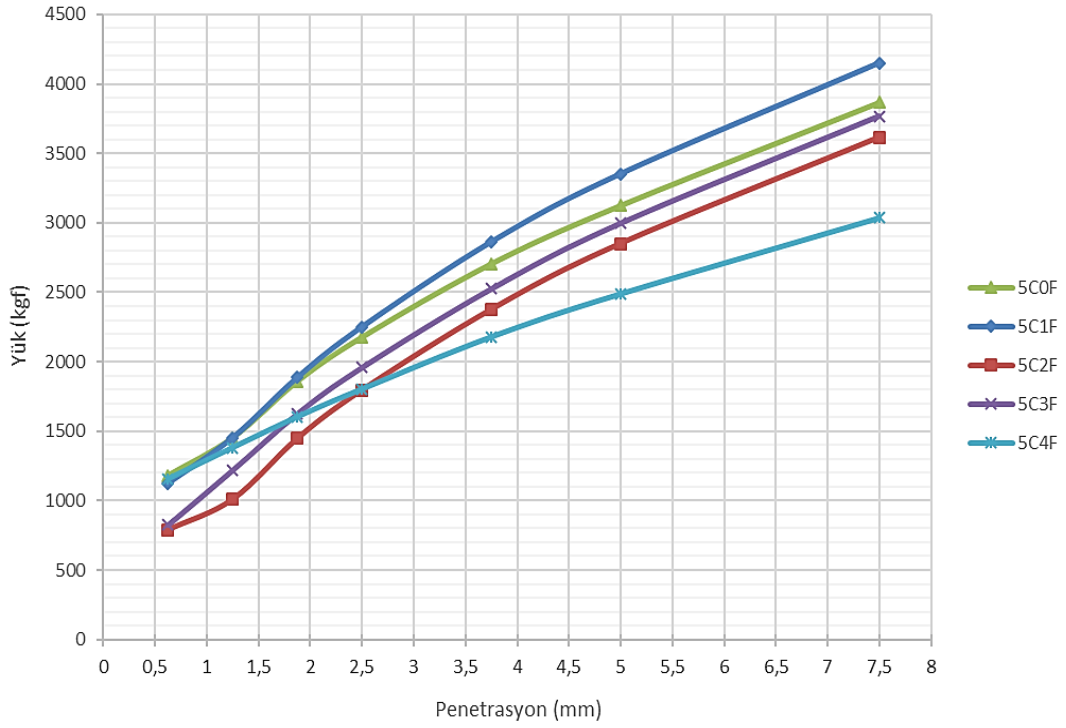
Şekil 4.6. %2,5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin yük-penetrasyon grafiği.

%5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelere ait CBR deneyi sonuçları Çizelge 4.7'de verilmekte olup bu serilere ait yük-penetrasyon grafiği Şekil

4.7’de sunulmuştur.

Çizelge 4.7. %5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin CBR deneyi sonuçları.

Numune Serisi	Penetrasyon (mm)						CBR (%)
	2,5 mm			5 mm			
	Standart Yük (kgf)	Düzeltilmiş Yük (kgf)	CBR (%)	Standart Yük (kgf)	Düzeltilmiş Yük (kgf)	CBR (%)	
5C0F	1360	2175,66	159,97	2040	3124,38	153,16	159,97
5C1F	1360	2249,71	165,42	2040	3352,55	164,34	165,42
5C2F	1360	1795,37	132,01	2040	2850,17	139,71	139,71
5C3F	1360	1957,49	143,93	2040	2996,28	146,88	146,88
5C4F	1360	1803,37	132,60	2040	2489,90	122,05	132,60

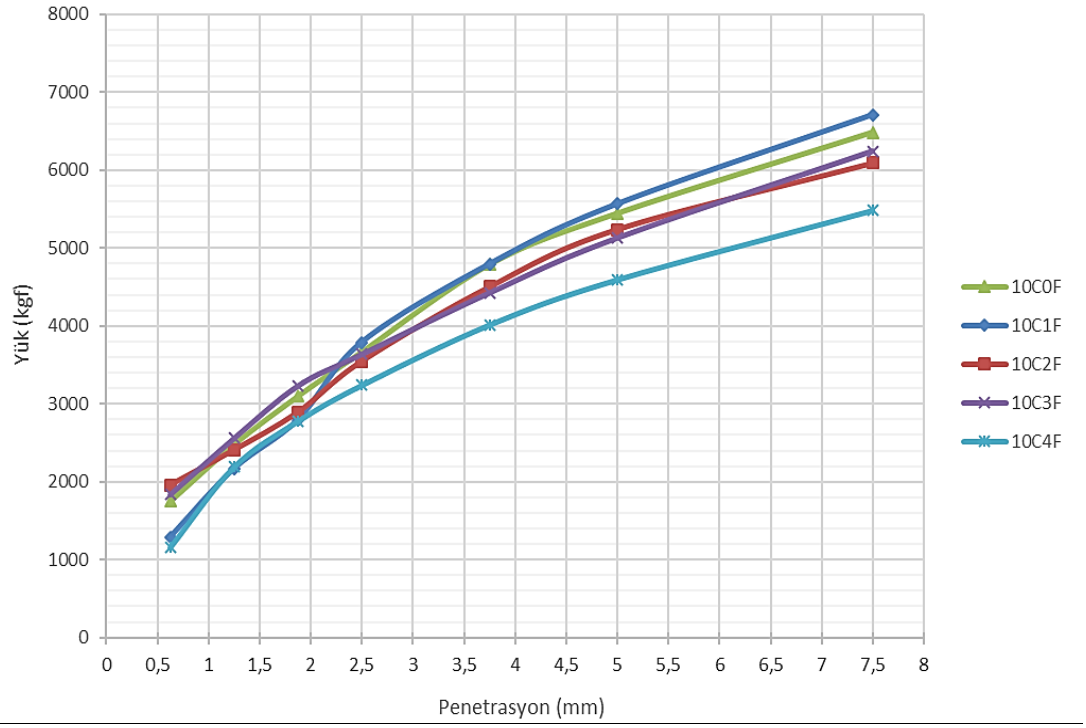


Şekil 4.7. %5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin yük-penetrasyon grafiği.

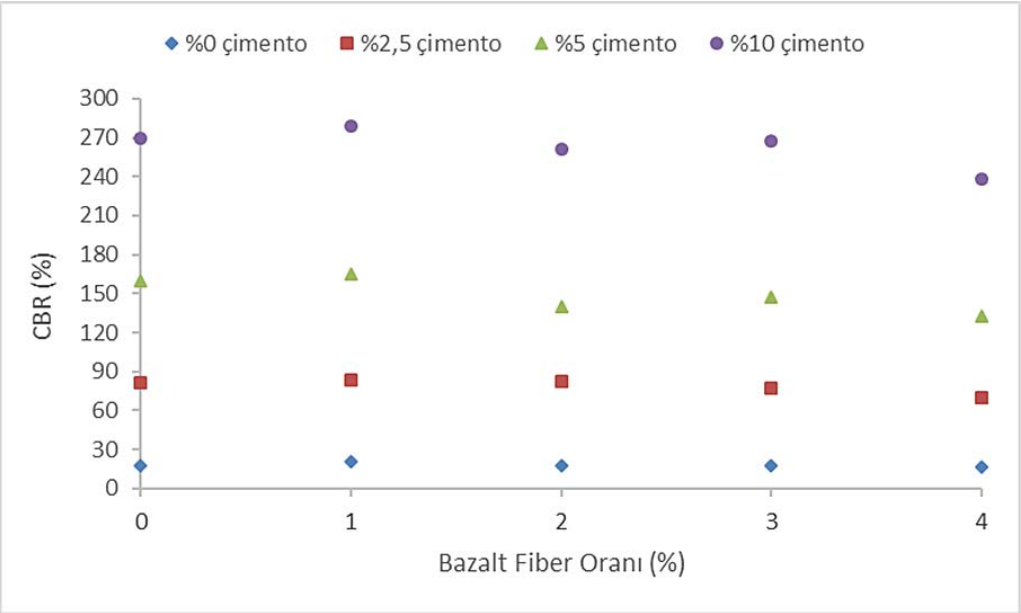
%10 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelere ait CBR deneyi sonuçları Çizelge 4.8’de verilmekte olup bu serilere ait yük-penetrasyon grafiği Şekil 4.8’de sunulmuştur.

Çizelge 4.8. %10 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin CBR deneyi sonuçları.

Numune Serisi	Penetrasyon (mm)						CBR (%)
	2,5 mm			5 mm			
	Standart Yük (kgf)	Düzeltilmiş Yük (kgf)	CBR (%)	Standart Yük (kgf)	Düzeltilmiş Yük (kgf)	CBR (%)	
10C0F	1360	3666,79	269,62	2040	5446,15	266,97	269,62
10C1F	1360	3790,89	278,74	2040	5566,24	272,85	278,74
10C2F	1360	3546,70	260,79	2040	5237,99	256,76	260,79
10C3F	1360	3636,77	267,41	2040	5129,91	251,47	267,41
10C4F	1360	3238,47	238,12	2040	4593,50	225,17	238,12



Şekil 4.8. %10 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin yük-penetrasyon grafiği.



Şekil 4.9. Tüm serilerin CBR deney sonuçlarının karşılaştırmalı grafiği.

CBR deney sonuçları incelendiğinde çimento oranının artmasıyla birlikte CBR değerlerinde, dolayısıyla zeminin taşıma gücünde sürekli bir artışın olduğu görülmektedir. Çimento katkısının olmadığı numune serilerinden en küçük CBR değerine sahip olan seri ile %10 çimento katkısının olduğu numune serilerinden en büyük CBR değerine sahip olan seri karşılaştırıldığında, zemin numunelerinin taşıma gücündeki bu artışın yaklaşık 17 katına kadar çıktığı anlaşılmaktadır. Ancak, fiber katkısının %1 olduğu seviye tüm seriler için en yüksek CBR değerini vermektedir. Bu bağlamda, çimento ve fiber katkısı, zeminin taşıma gücü açısından birlikte değerlendirildiğinde ağırlıkça %10 oranında çimento ve %1 oranında bazalt fiber katkılı numune serisinin optimum karışım oranlarına sahip olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. En yüksek CBR değeri, %10 çimento ve %1 fiber katkılı numunenin testi sonucunda erişilen %278,74 iken; çimento katkısının olmadığı, %4 fiber katkılı numunenin %16,88 CBR değeri ile en düşük taşıma gücüne sahip olduğu gözlenmiştir.

4.3. KESME KUTUSU DENEYİ SONUÇLARI

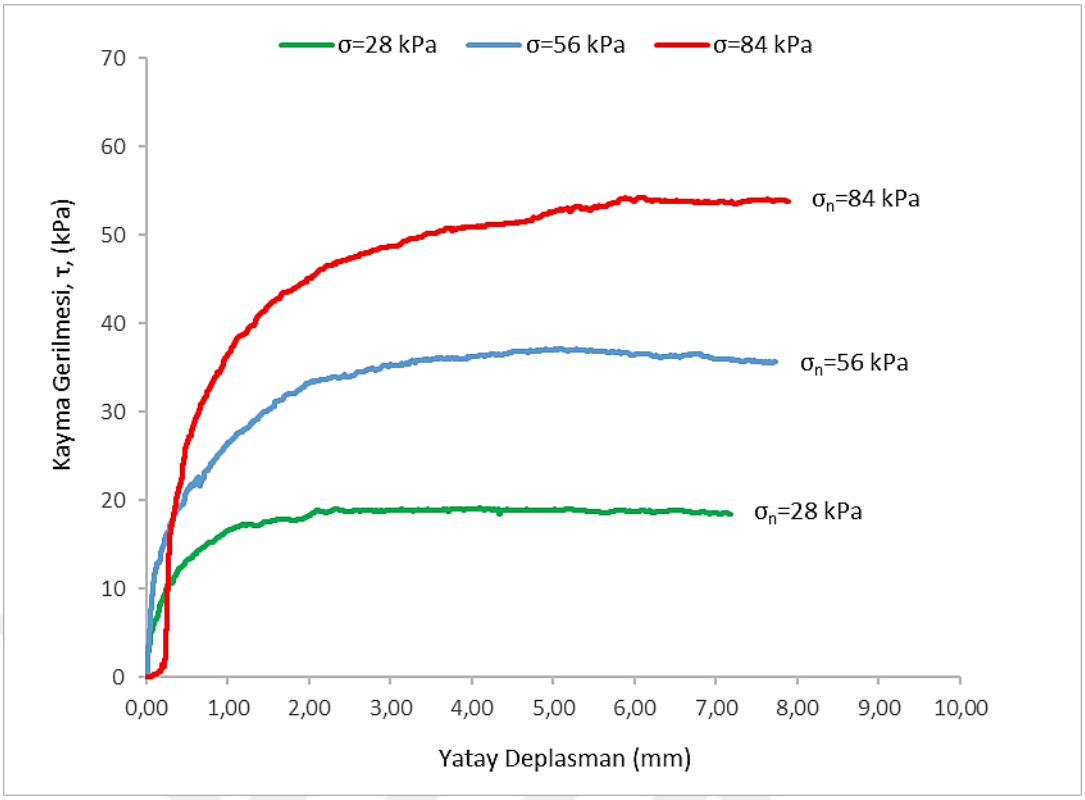
%0 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kesme kutusu deney sonuçlarından elde edilen normal gerilmeler ve en büyük kayma gerilmeleri ile kayma mukavemeti parametreleri olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri Çizelge 4.9'da sunulmuştur.

Çizelge 4.9. %0 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kesme kutusu deney sonuçları.

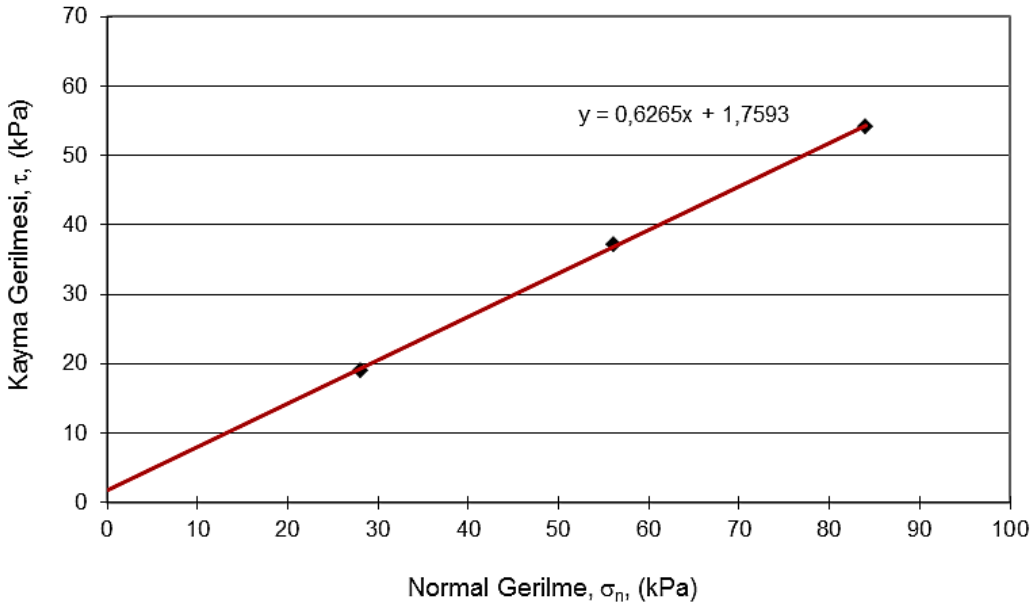
Numune Serisi	σ_n (kPa)	τ_{mak} (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)
0C0F	28	19,14	1,76	32
	56	37,17		
	84	54,22		
0C1F	28	21,69	2,75	34
	56	41,78		
	84	60,14		
0C2F	28	26,36	8,47	34
	56	47,03		
	84	63,53		
0C3F	28	27,22	7,66	35
	56	47,50		
	84	66,69		
0C4F	28	29,28	9,93	34
	56	45,86		
	84	66,58		

Çizelge 4.9'daki sonuç verilerinden de görüleceği üzere çimento katkısının olmadığı zemin numunelerinde bazalt fiber oranının artmasıyla birlikte maksimum kayma gerilmesinde %4 fiber katkısına kadar artış olmaktadır. İlave fiber kullanılarak fiber oranının %4'e çıkarılması durumunda ise zeminin kayma mukavemetinin genellikle düştüğü veya sabit kaldığı gözlenmiştir. 84 kPa normal gerilme altında maksimum kayma dayanımındaki en büyük artış %23 olarak hesaplanmıştır. İçsel sürtünme açısı en yüksek değerine %3 fiber katkılı numunede erişirken kohezyonun maksimum olduğu numunenin ise %4 fiber katkılı karışım olduğu görülmektedir. Ağırlıkça %3 oranında bazalt fiber katkısıyla birlikte katkısız numuneye kıyasla içsel sürtünme açısı 32°'den 35°'ye çıkmaktayken, %4 oranında bazalt fiber katkısıyla birlikte kohezyon değerinde ise 8,17 kPa artış olmuştur. En büyük içsel sürtünme açısı 35°, en yüksek kohezyon değeri ise 9,93 kPa olarak tespit edilmiştir.

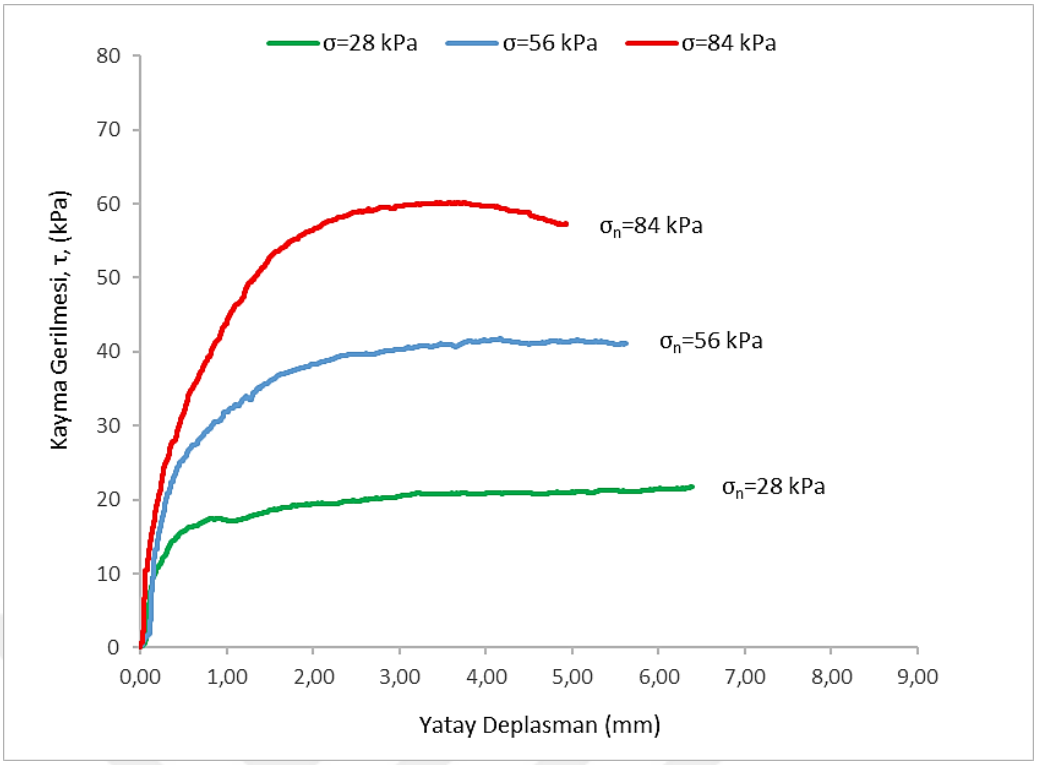
%0 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı serilere ait kayma gerilmesi-yatay deplasman grafikleri Şekil 4.10, Şekil 4.12, Şekil 4.14, Şekil 4.16, Şekil 4.18'de; kırılma zarfları ise Şekil 4.11, Şekil 4.13, Şekil 4.15, Şekil 4.17, Şekil 4.19'da gösterilmektedir.



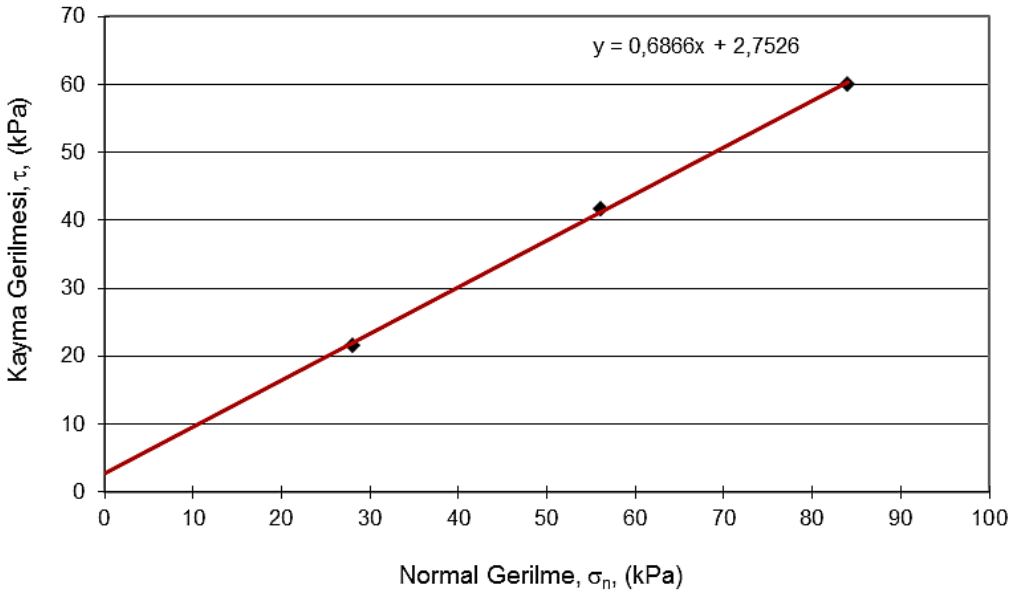
Şekil 4.10. Katkısız numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği.



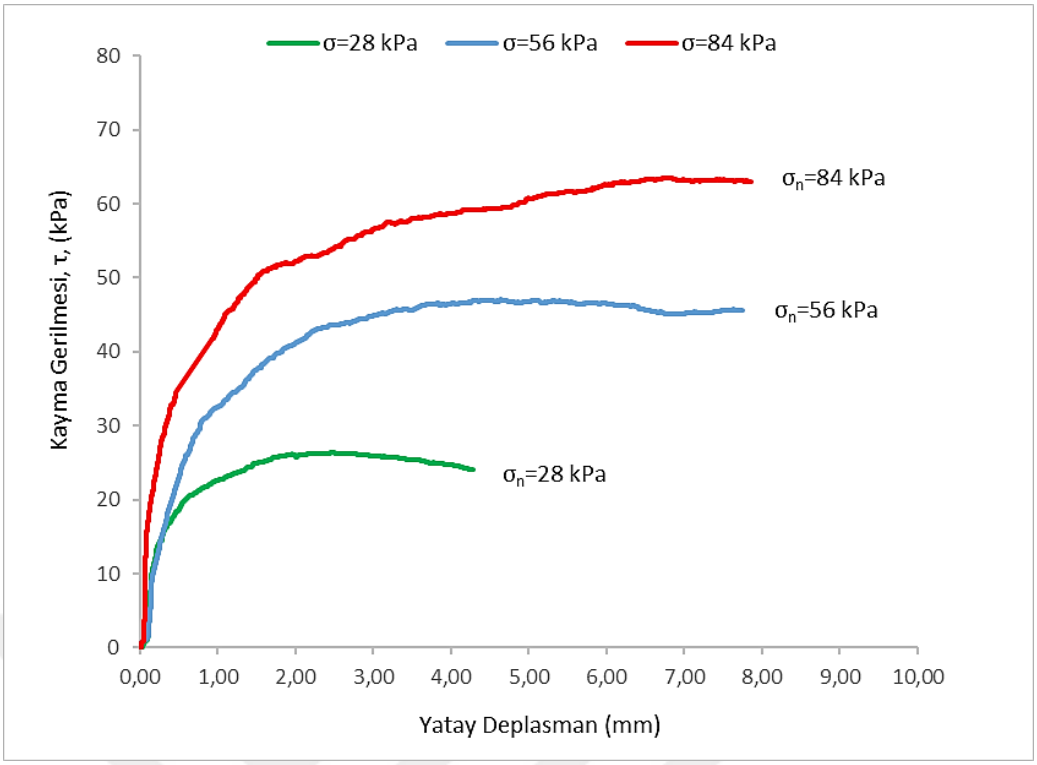
Şekil 4.11. Katkısız numunenin kırılma zarfı.



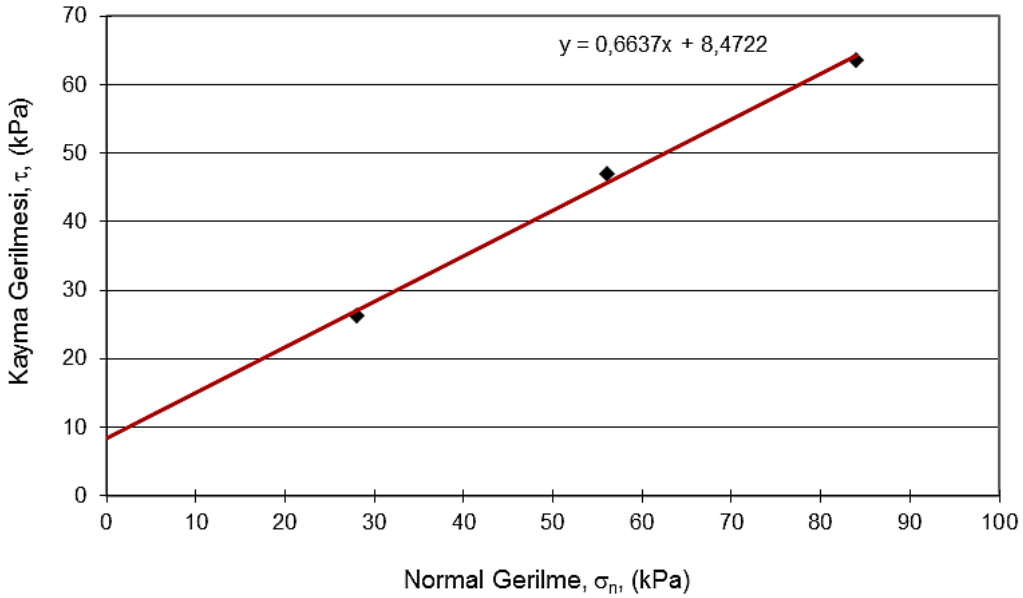
Şekil 4.12. %0 çimento ve %1 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği.



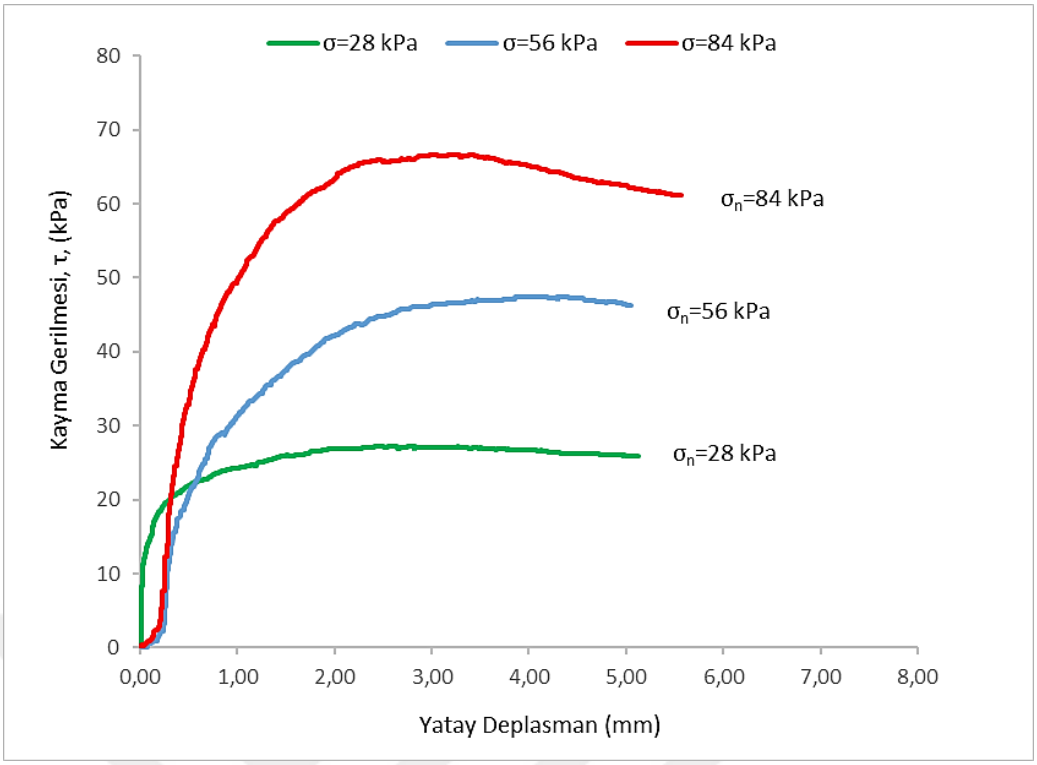
Şekil 4.13. %0 çimento ve %1 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı.



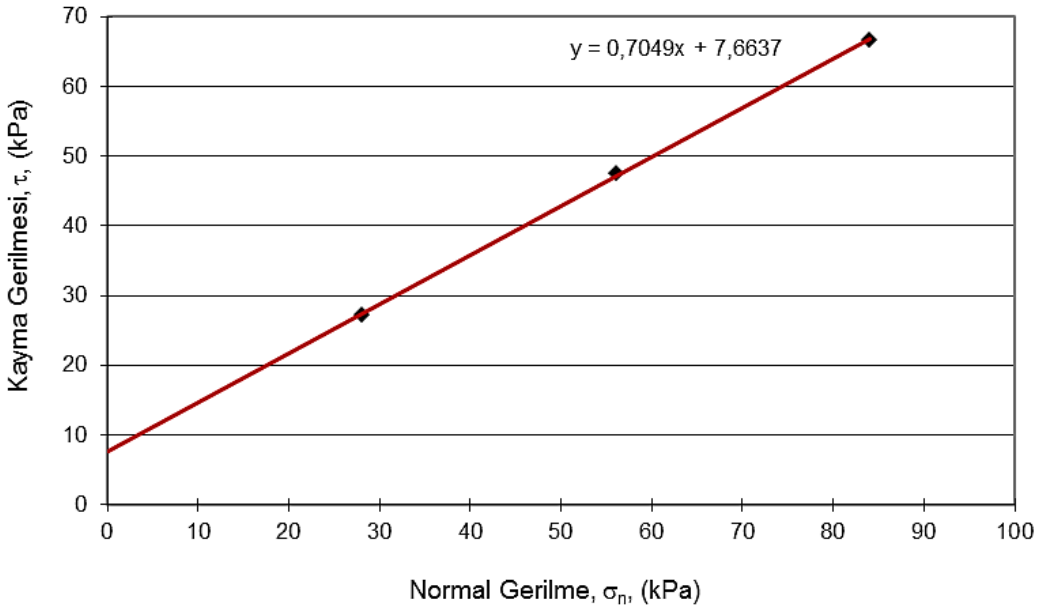
Şekil 4.14. %0 çimento ve %2 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği.



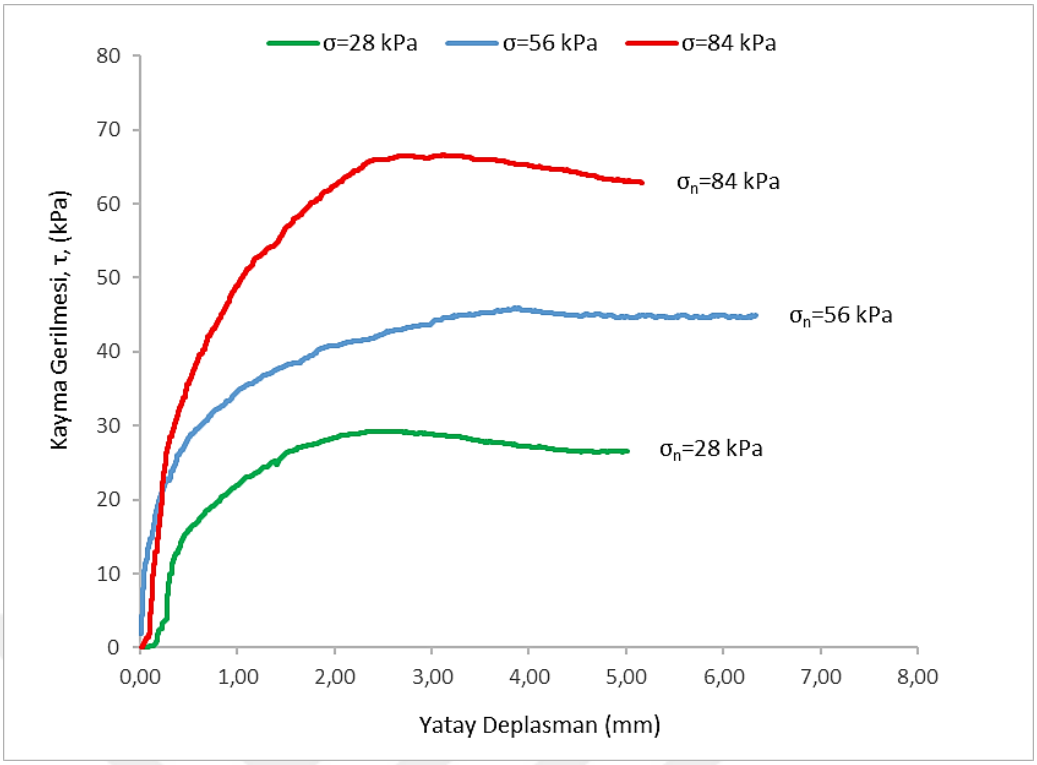
Şekil 4.15. %0 çimento ve %2 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı.



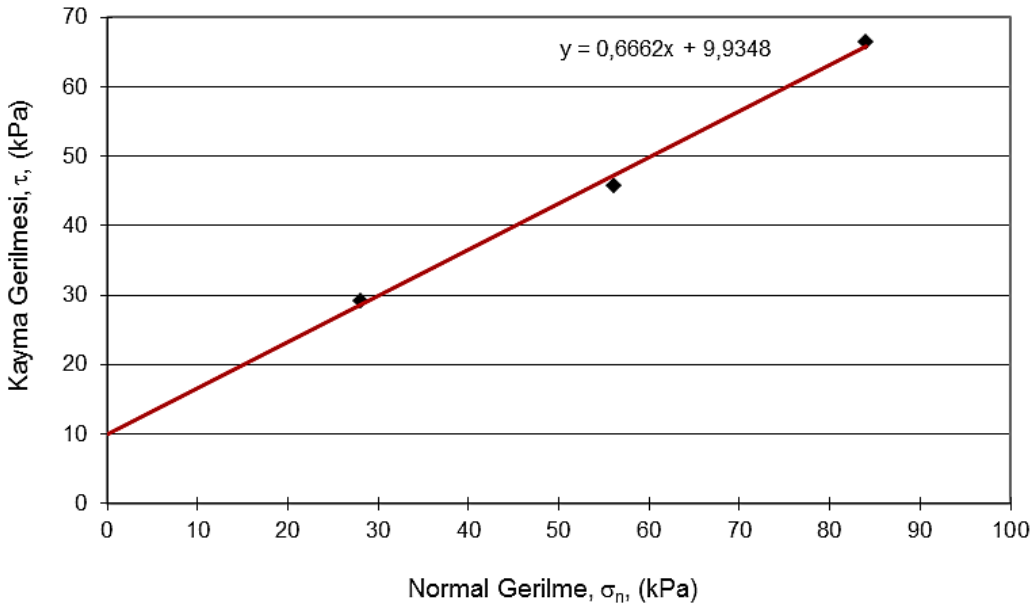
Şekil 4.16. %0 çimento ve %3 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği.



Şekil 4.17. %0 çimento ve %3 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı.



Şekil 4.18. %0 çimento ve %4 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği.



Şekil 4.19. %0 çimento ve %4 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı.

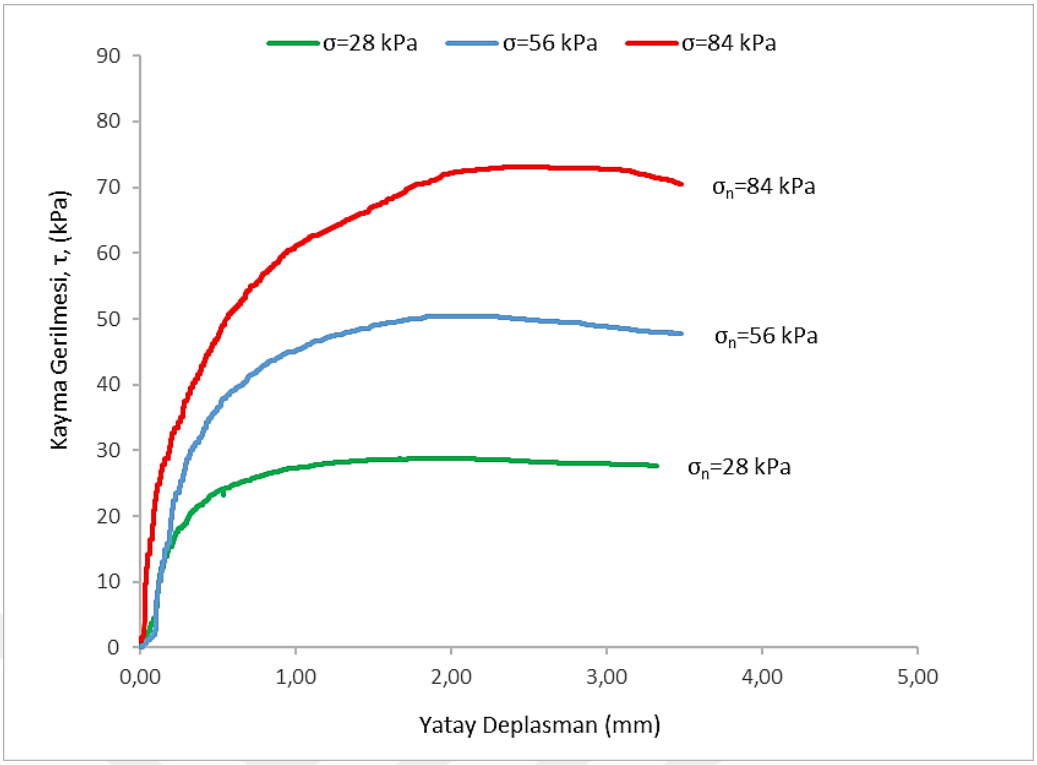
%2,5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kesme kutusu deney sonuçlarından elde edilen normal gerilmeler ve en büyük kayma gerilmeleri ile kayma mukavemeti parametreleri olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri Çizelge 4.10'da sunulmuştur.

Çizelge 4.10. %2,5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kesme kutusu deney sonuçları.

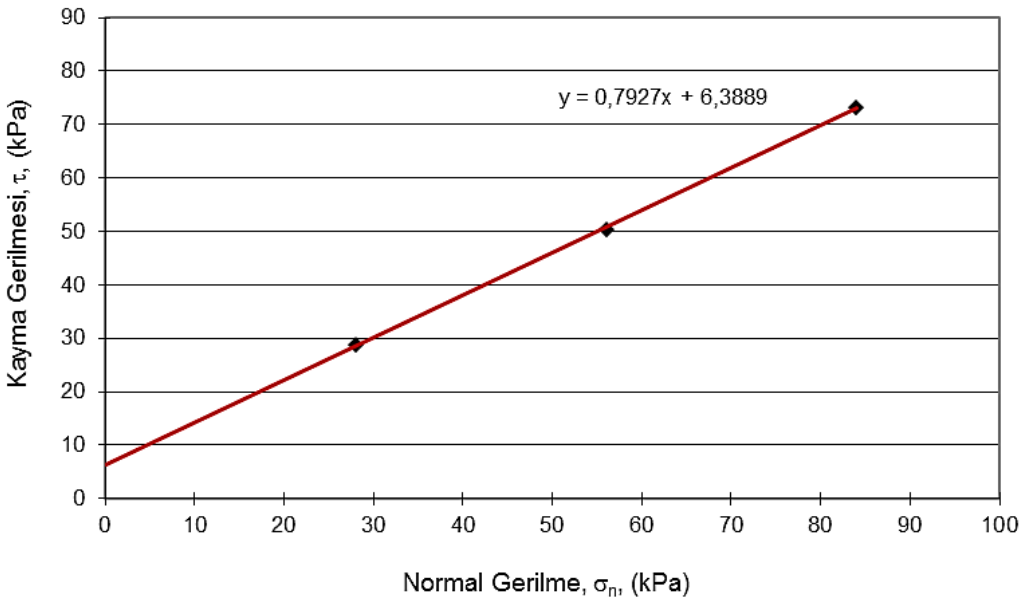
Numune Serisi	σ_n (kPa)	τ_{mak} (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)
2,5C0F	28	28,75	6,39	38
	56	50,44		
	84	73,14		
2,5C1F	28	32,22	8,55	39
	56	51,86		
	84	77,56		
2,5C2F	28	30,17	8,68	39
	56	54,86		
	84	74,75		
2,5C3F	28	34,75	9,96	41
	56	59,33		
	84	84,22		
2,5C4F	28	34,25	8,13	43
	56	58,67		
	84	85,64		

Çizelge 4.10 incelendiğinde %2,5 çimento katkısının olduğu zemin numunelerinde artan bazalt fiber oranı, maksimum kayma direncinde %4 fiber katkı oranına kadar artışa sebep olmaktadır. İlave fiber kullanılarak fiber oranının %4'e çıkarılması halinde ise zeminin kayma direncinin düştüğü veya neredeyse sabit kaldığı saptanmıştır. 84 kPa normal gerilme altında maksimum kayma dayanımındaki en büyük artış %17 olarak hesaplanmıştır. İçsel sürtünme açısı en yüksek değerine %4 fiber katkılı numunede erişirken kohezyonun maksimum olduğu numunenin ise %3 fiber katkılı karışım olduğu görülmektedir. Ağırlıkça %4 oranında bazalt fiber katkısıyla birlikte fiber katkısız numuneye kıyasla içsel sürtünme açısı 38°'den 43°'ye yükselmekteyken, %3 oranında bazalt fiber katkısıyla birlikte kohezyon değerinde ise 3,57 kPa artış olmuştur. En büyük içsel sürtünme açısı 43°, en yüksek kohezyon değeri ise 9,96 kPa olarak hesaplanmıştır.

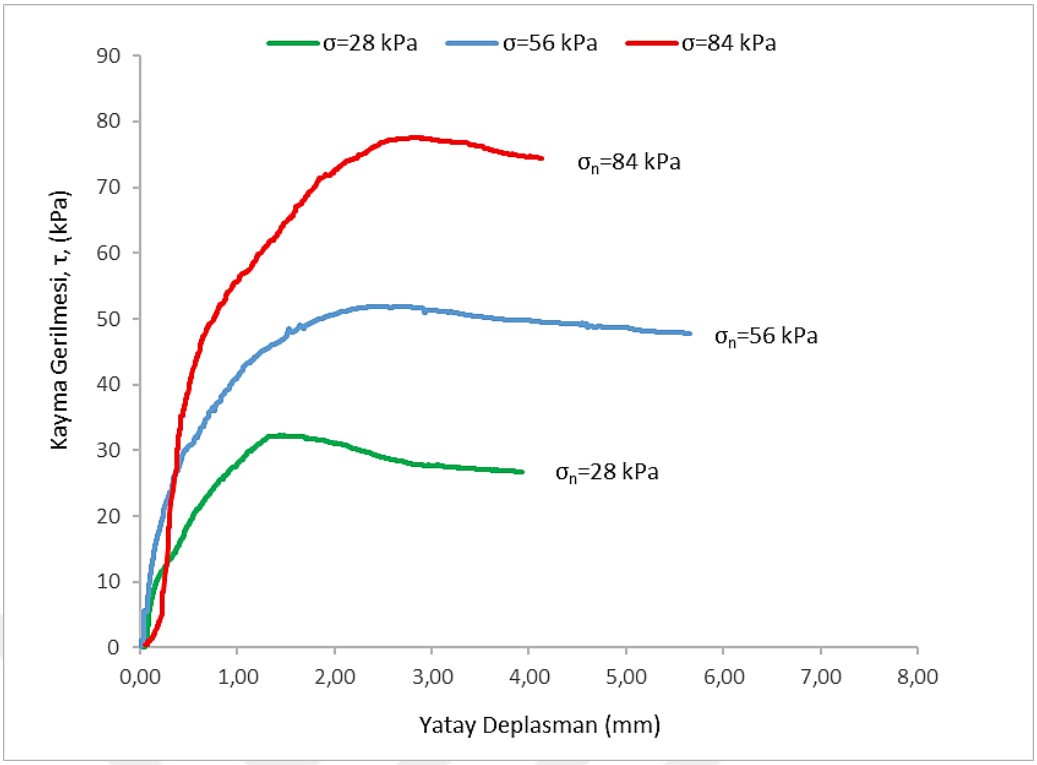
%2,5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı serilere ait kayma gerilmesi-yatay deplasman grafikleri Şekil 4.20, Şekil 4.22, Şekil 4.24, Şekil 4.26, Şekil 4.28'de; kırılma zarfları ise Şekil 4.21, Şekil 4.23, Şekil 4.25, Şekil 4.27, Şekil 4.29'da gösterilmektedir.



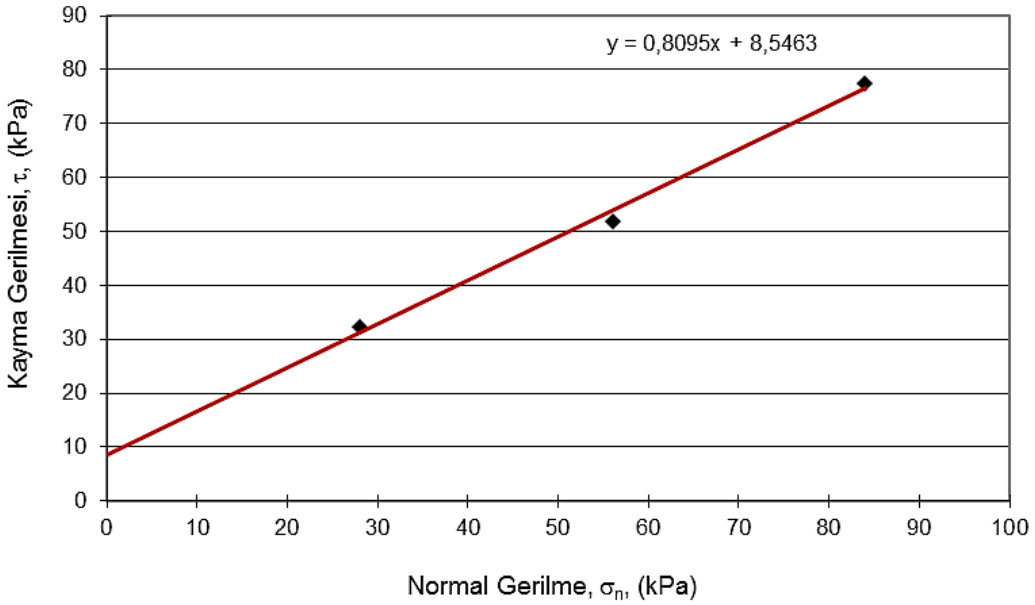
Şekil 4.20. %2,5 çimento ve %0 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği.



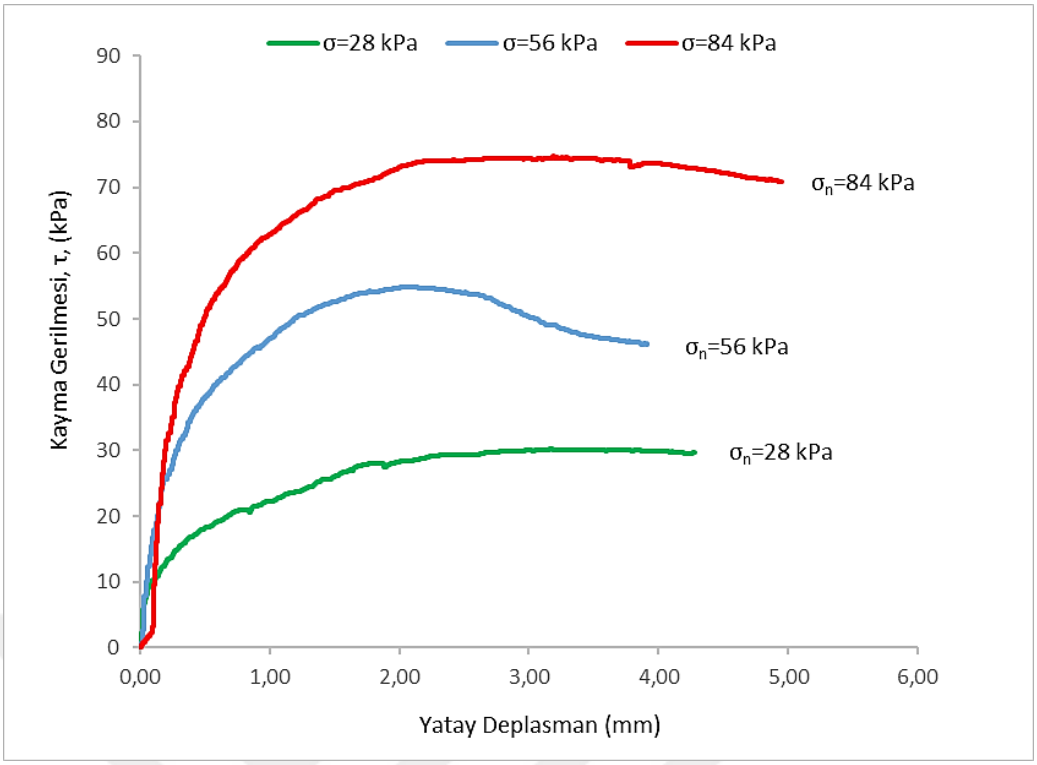
Şekil 4.21. %2,5 çimento ve %0 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı.



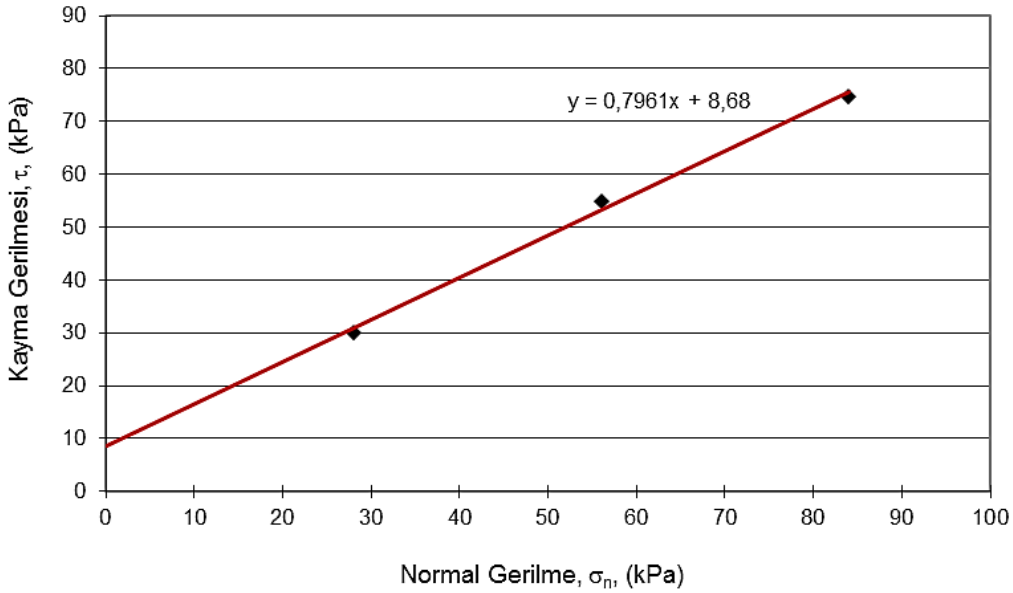
Şekil 4.22. %2,5 çimento ve %1 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği.



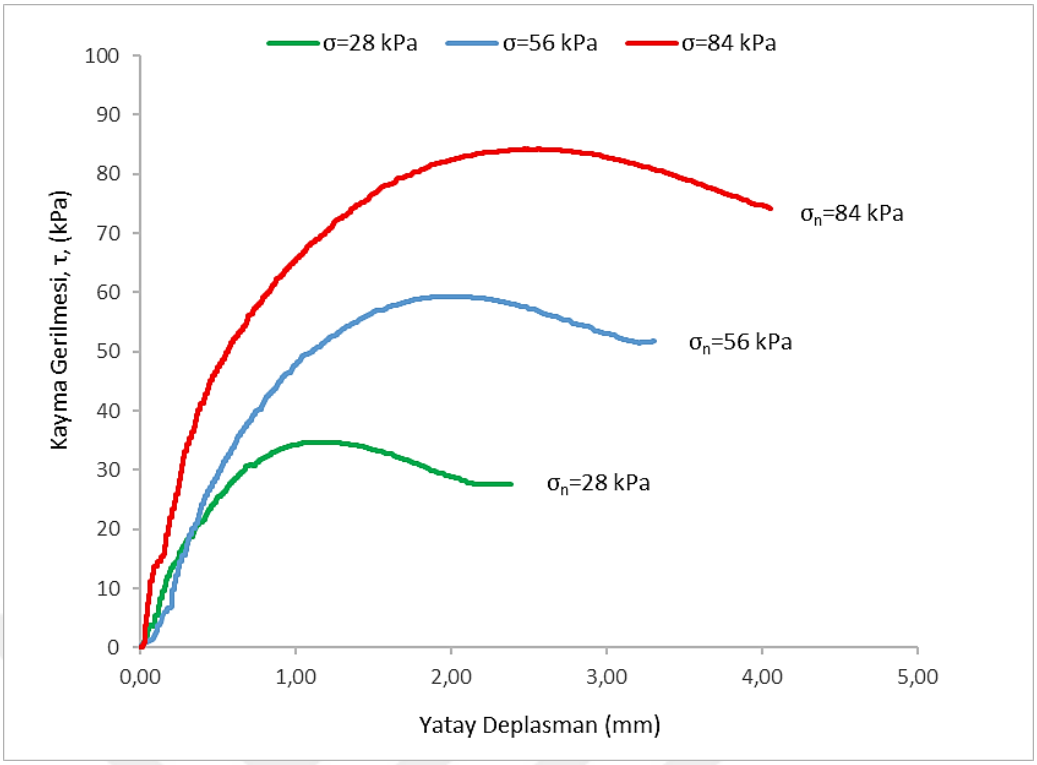
Şekil 4.23. %2,5 çimento ve %1 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı.



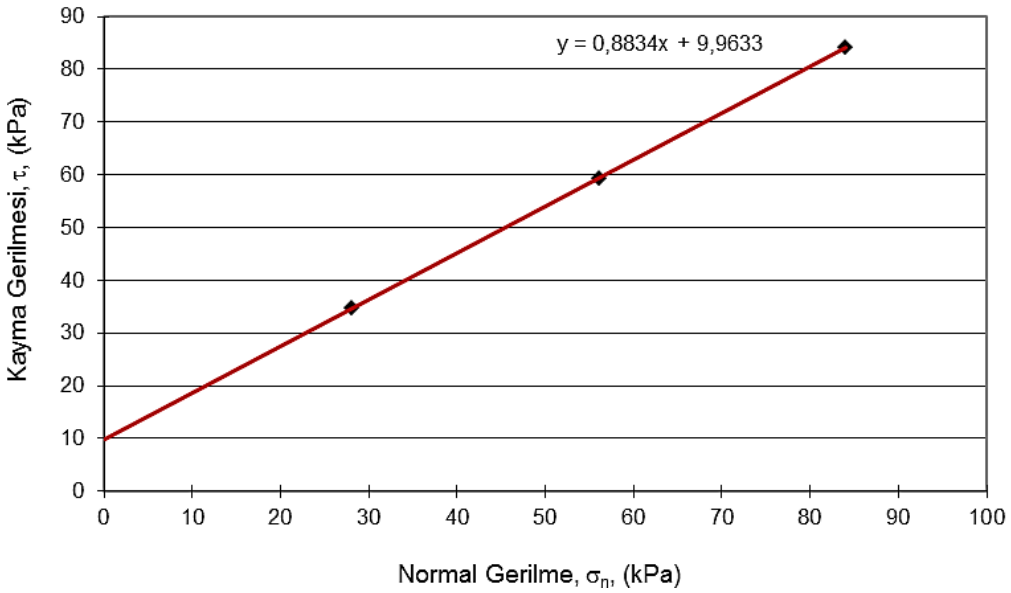
Şekil 4.24. %2,5 çimento ve %2 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği.



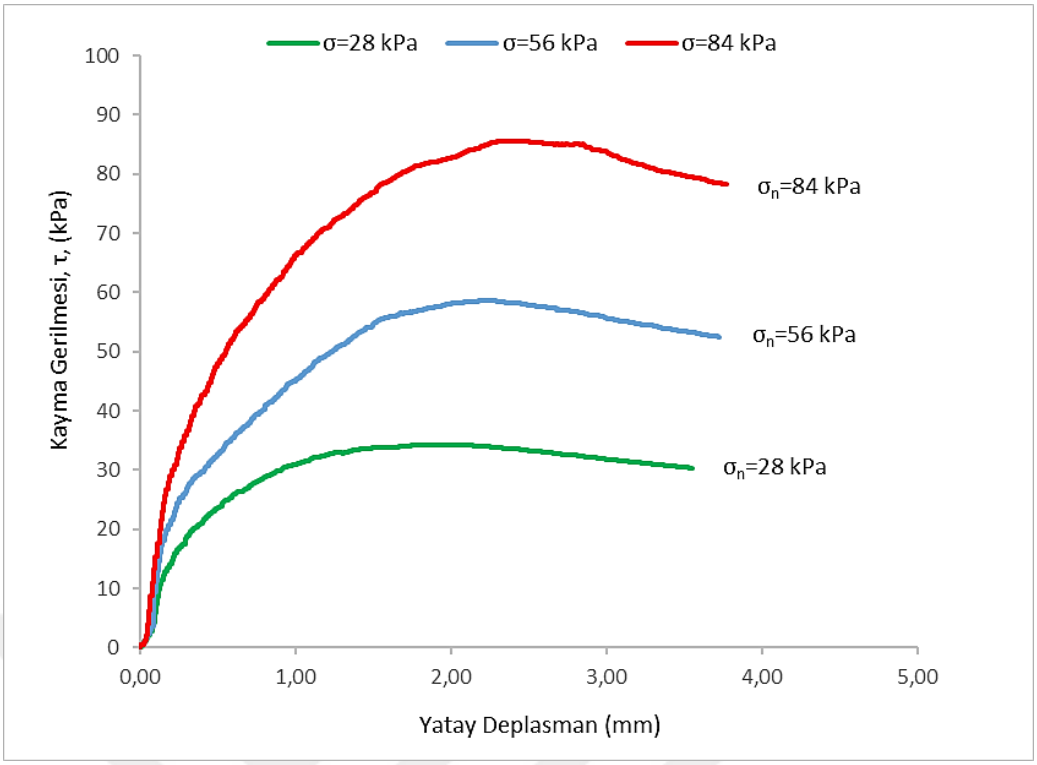
Şekil 4.25. %2,5 çimento ve %2 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı.



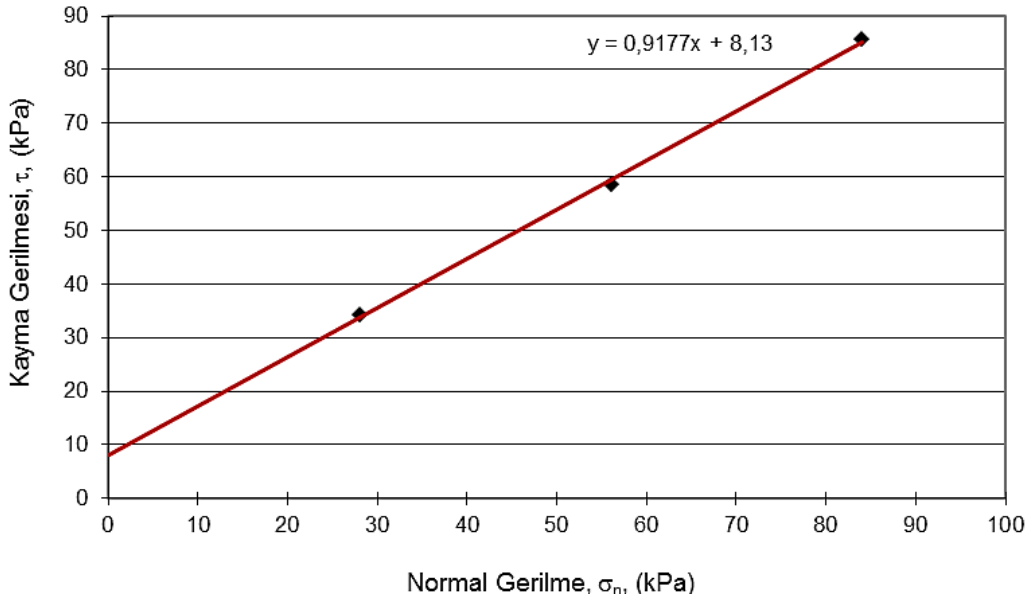
Şekil 4.26. %2,5 çimento ve %3 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği.



Şekil 4.27. %2,5 çimento ve %3 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı.



Şekil 4.28. %2,5 çimento ve %4 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği.



Şekil 4.29. %2,5 çimento ve %4 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı.

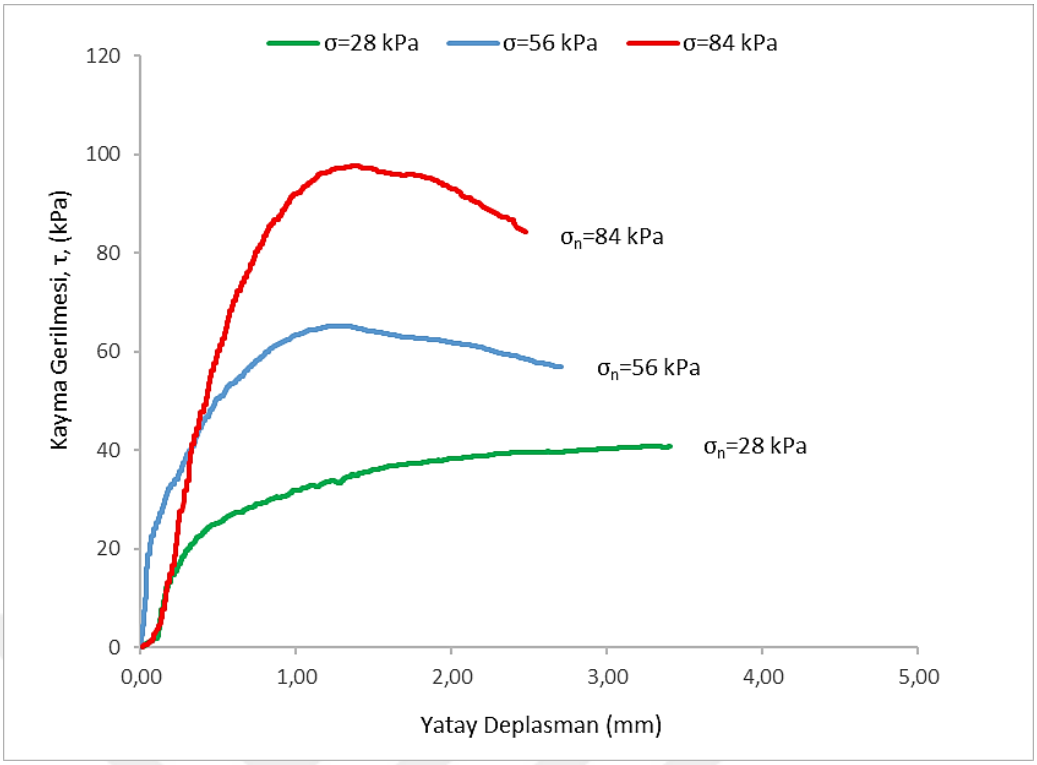
%5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kesme kutusu deney sonuçlarından elde edilen normal gerilmeler ve en büyük kayma gerilmeleri ile kayma mukavemeti parametreleri olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri Çizelge 4.11'de sunulmuştur.

Çizelge 4.11. %5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kesme kutusu deney sonuçları.

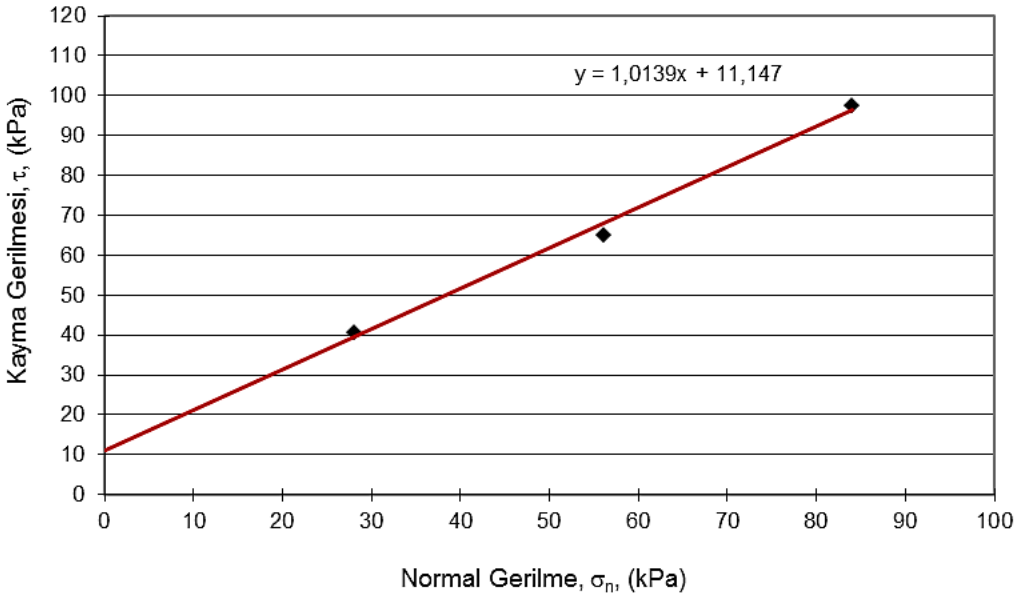
Numune Serisi	σ_n (kPa)	τ_{mak} (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)
5C0F	28	40,86	11,15	45
	56	65,28		
	84	97,64		
5C1F	28	42,42	13,67	45
	56	67,17		
	84	97,92		
5C2F	28	41,36	14,17	46
	56	73,86		
	84	98,39		
5C3F	28	42,72	10,78	48
	56	72,61		
	84	105,58		
5C4F	28	45,11	13,04	48
	56	74,53		
	84	107,92		

Çizelge 4.11 incelendiğinde %5 çimento katkılı zemin numunelerinde bazalt fiber oranının artışıyla birlikte maksimum kayma direncinde de sürekli bir artışın olduğu anlaşılmaktadır. 84 kPa normal gerilme altında maksimum kayma dayanımındaki en büyük artış %11 olarak tespit edilmiştir. İçsel sürtünme açısı en yüksek değerine %3 ve %4 fiber katkılı numune serilerinde ulaşırken kohezyonun maksimum olduğu numunenin ise %2 fiber katkılı karışım olduğu görülmektedir. Ağırlıkça %3 ve %4 oranında bazalt fiber katkısıyla birlikte fiber katkısız numuneye kıyasla içsel sürtünme açısı 45°'den 48°'ye çıkmaktayken, %2 oranında bazalt fiber katkısıyla birlikte kohezyon değerinde ise 3,02 kPa artış olmuştur. En büyük içsel sürtünme açısı 48°, en yüksek kohezyon değeri ise 14,17 kPa olarak hesaplanmıştır.

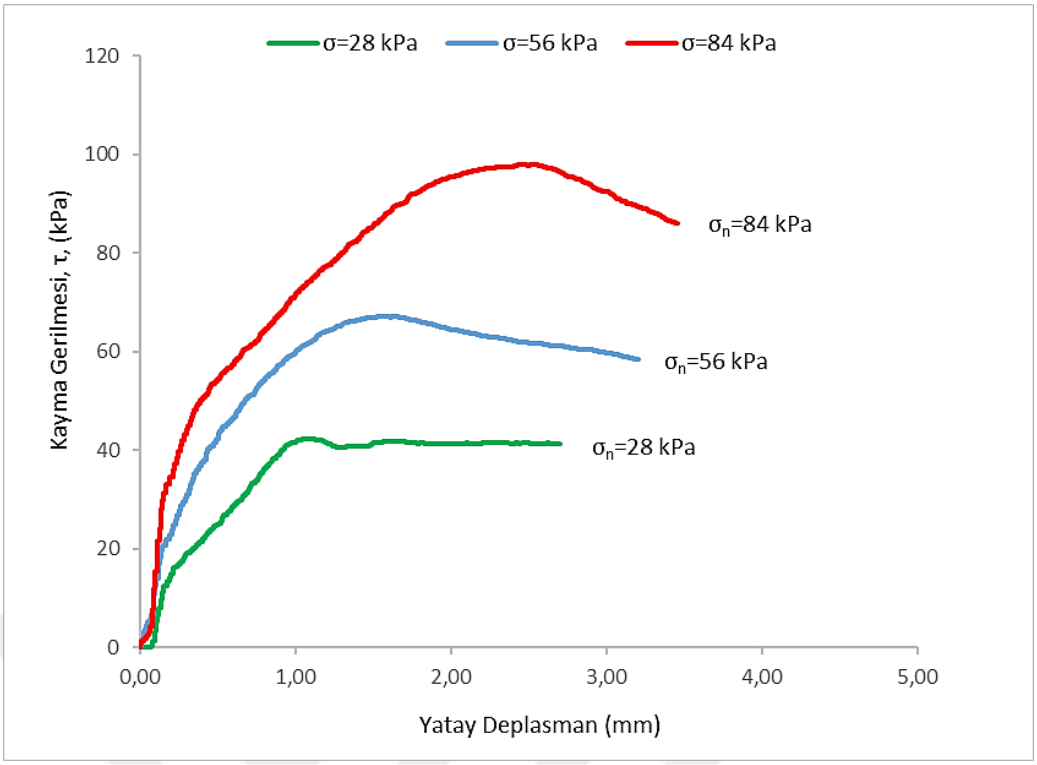
%5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı serilere ait kayma gerilmesi-yatay deplasman grafikleri Şekil 4.30, Şekil 4.32, Şekil 4.34, Şekil 4.36, Şekil 4.38'de; kırılma zarfları ise Şekil 4.31, Şekil 4.33, Şekil 4.35, Şekil 4.37, Şekil 4.39'da gösterilmektedir.



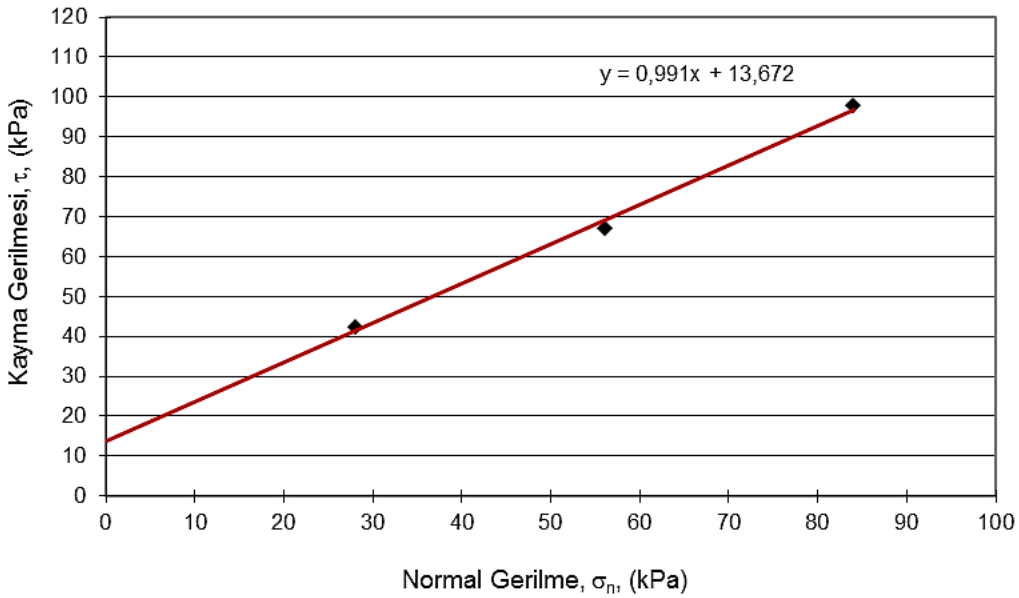
Şekil 4.30. %5 çimento ve %0 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği.



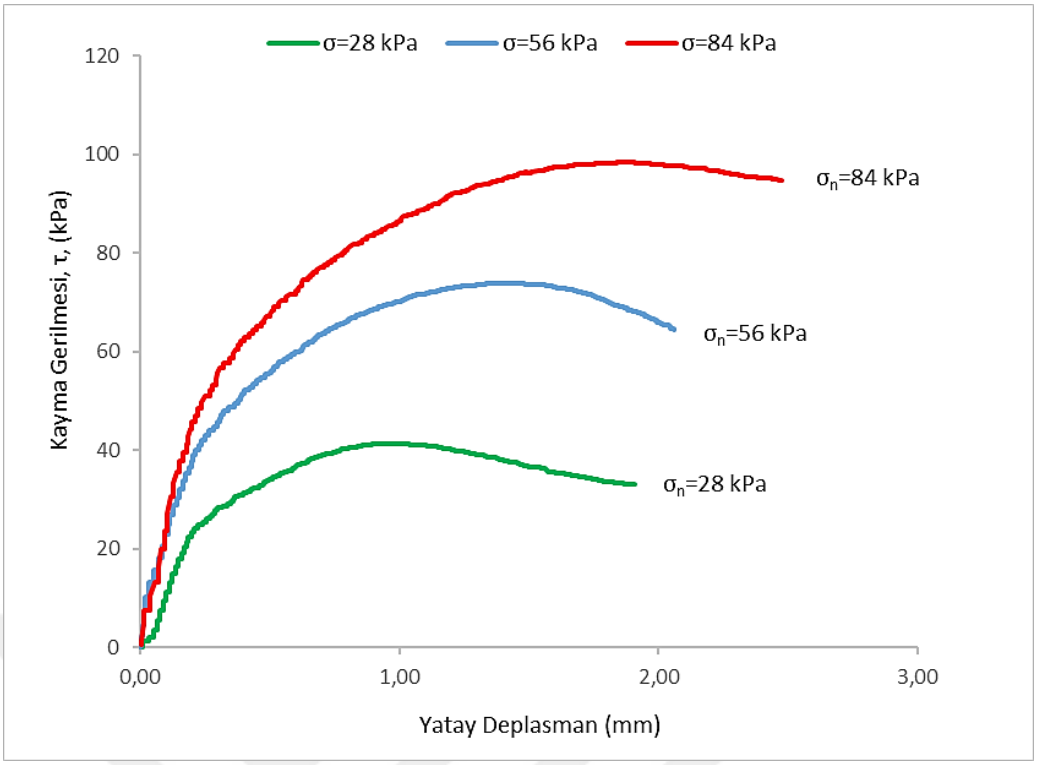
Şekil 4.31. %5 çimento ve %0 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı.



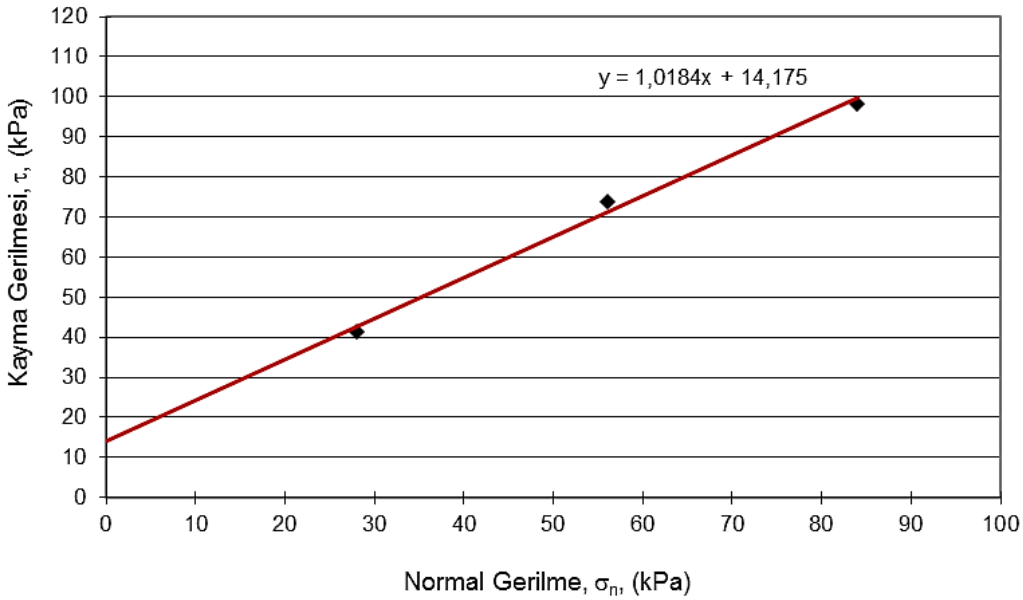
Şekil 4.32. %5 çimento ve %1 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği.



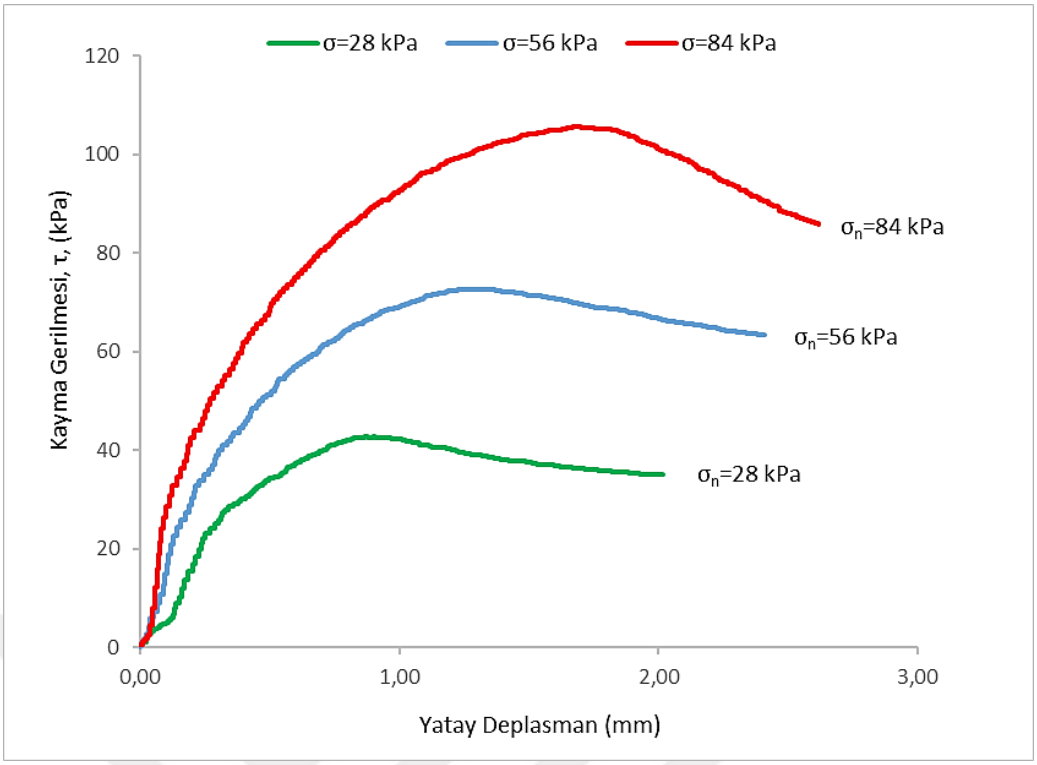
Şekil 4.33. %5 çimento ve %1 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı.



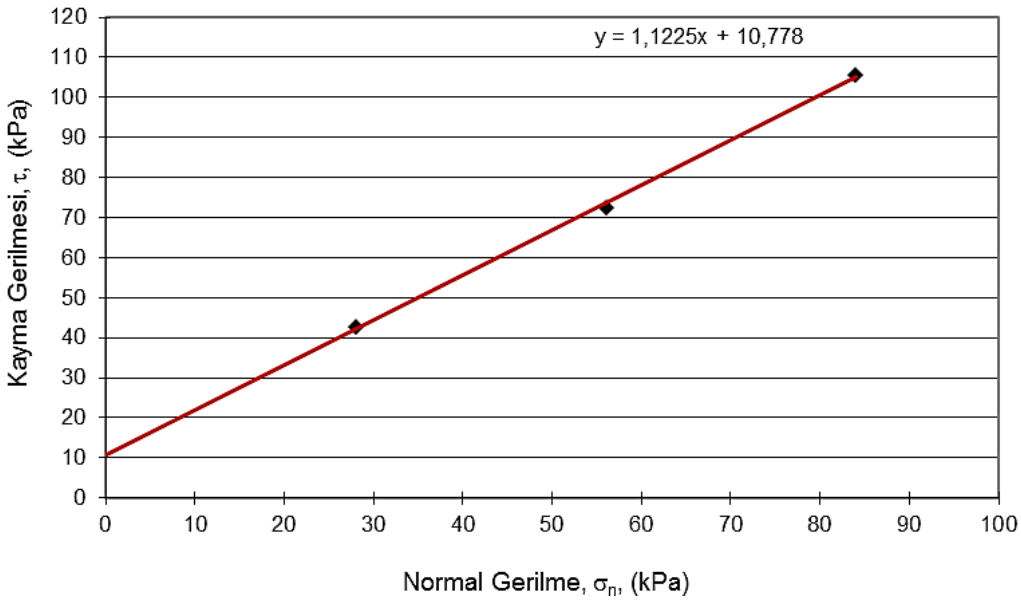
Şekil 4.34. %5 çimento ve %2 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği.



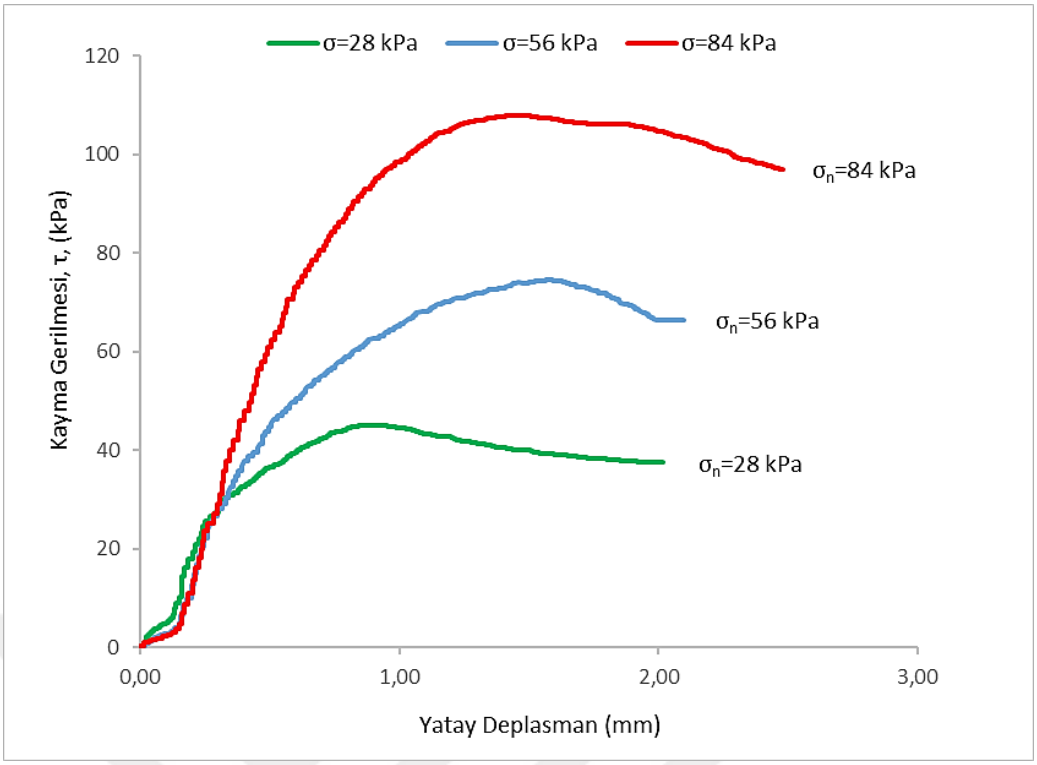
Şekil 4.35. %5 çimento ve %2 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı.



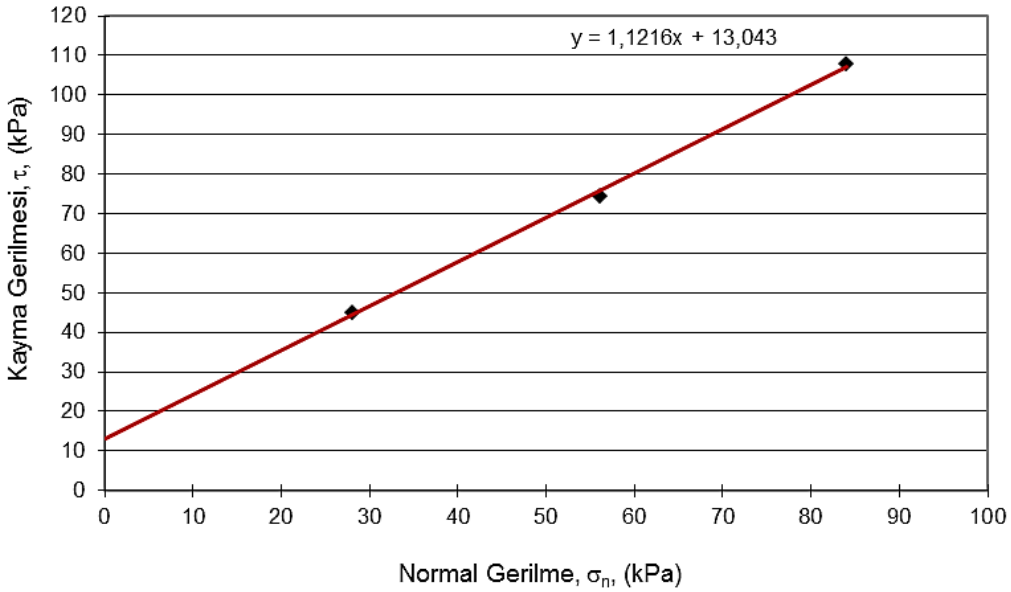
Şekil 4.36. %5 çimento ve %3 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği.



Şekil 4.37. %5 çimento ve %3 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı.



Şekil 4.38. %5 çimento ve %4 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği.



Şekil 4.39. %5 çimento ve %4 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı.

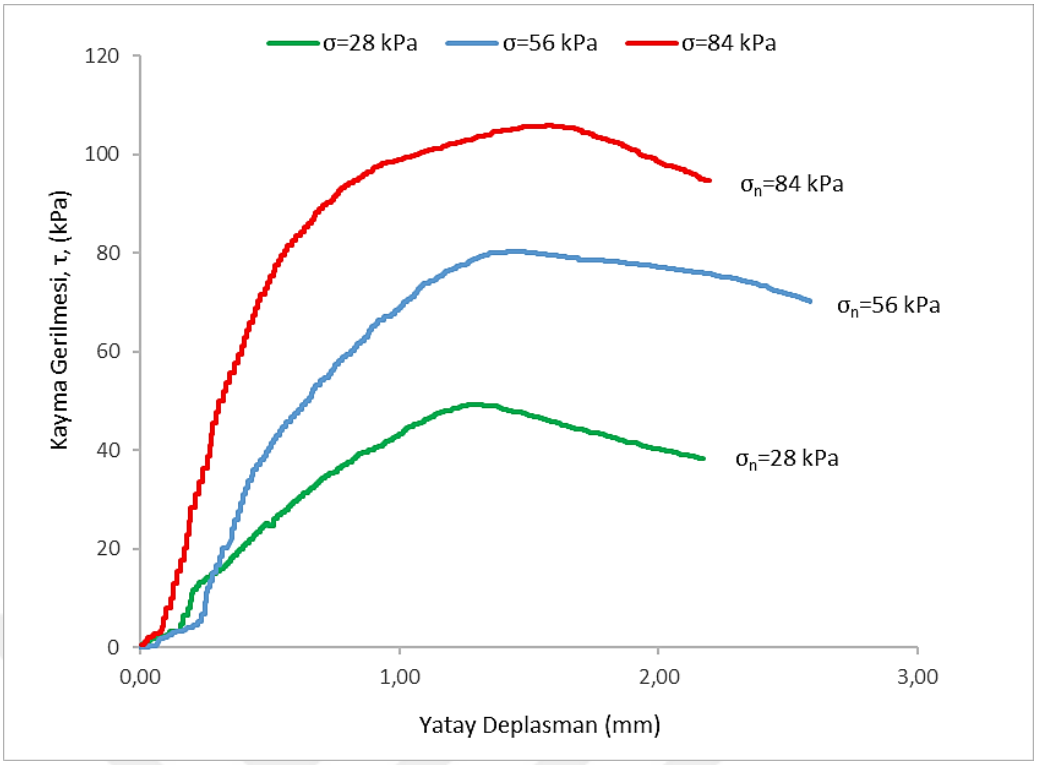
%10 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kesme kutusu deney sonuçlarından elde edilen normal gerilmeler ve en büyük kayma gerilmeleri ile kayma mukavemeti parametreleri olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri Çizelge 4.12'de sunulmuştur.

Çizelge 4.12. %10 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin kesme kutusu deney sonuçları.

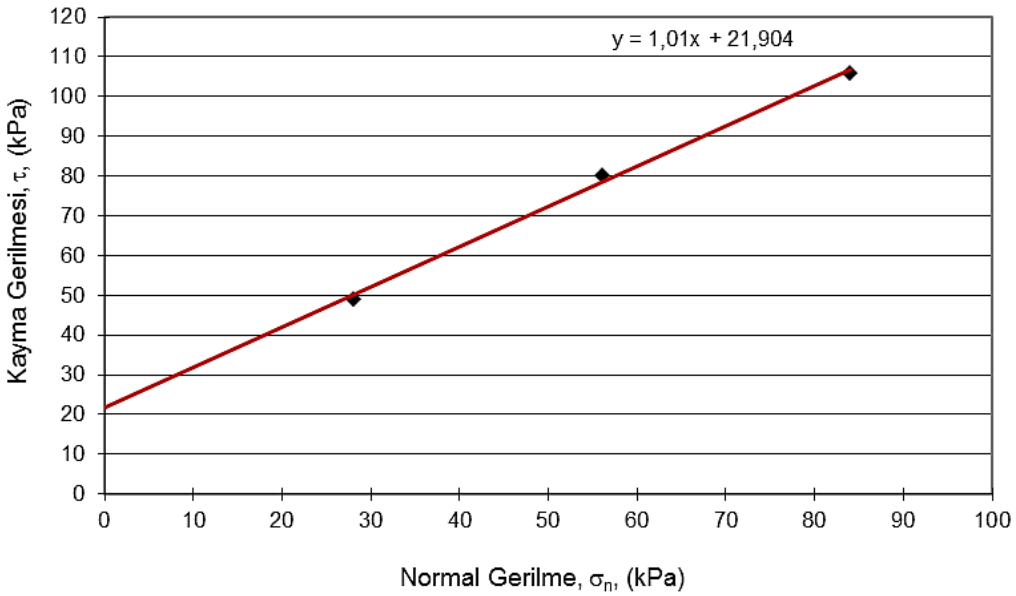
Numune Serisi	σ_n (kPa)	τ_{mak} (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)
10C0F	28	49,25	21,90	45
	56	80,33		
	84	105,81		
10C1F	28	54,31	26,17	45
	56	82,33		
	84	110,53		
10C2F	28	54,61	28,32	45
	56	86,14		
	84	109,81		
10C3F	28	60,53	30,92	47
	56	92,97		
	84	121,17		
10C4F	28	58,69	32,50	44
	56	88,06		
	84	112,67		

Çizelge 4.12'den de görüleceği üzere %10 çimento katkılı zemin numunelerinde bazalt fiber oranının artışıyla birlikte maksimum kayma direncinde %4 fiber oranına kadar artış olmaktadır. İlave fiber kullanılarak fiber oranının %4'e çıkarılması halinde ise zeminin kayma direncinin düştüğü gözlenmiştir. 84 kPa normal gerilme altında maksimum kayma dayanımındaki en büyük artış %15 olarak tespit edilmiştir. İçsel sürtünme açısı en yüksek değerine %3 fiber katkılı numune serisinde ulaşırken kohezyonun maksimum olduğu numunenin ise %4 fiber katkılı karışım olduğu görülmektedir. Ağırlıkça %3 oranında bazalt fiber katkısıyla birlikte fiber katkısız numuneye kıyasla içsel sürtünme açısı 45°'den 47°'ye çıkmaktayken, %4 oranında bazalt fiber katkısıyla birlikte kohezyon değerinde ise 10,60 kPa artış olmuştur. En büyük içsel sürtünme açısı 47°, en yüksek kohezyon değeri ise 32,50 kPa olarak hesaplanmıştır.

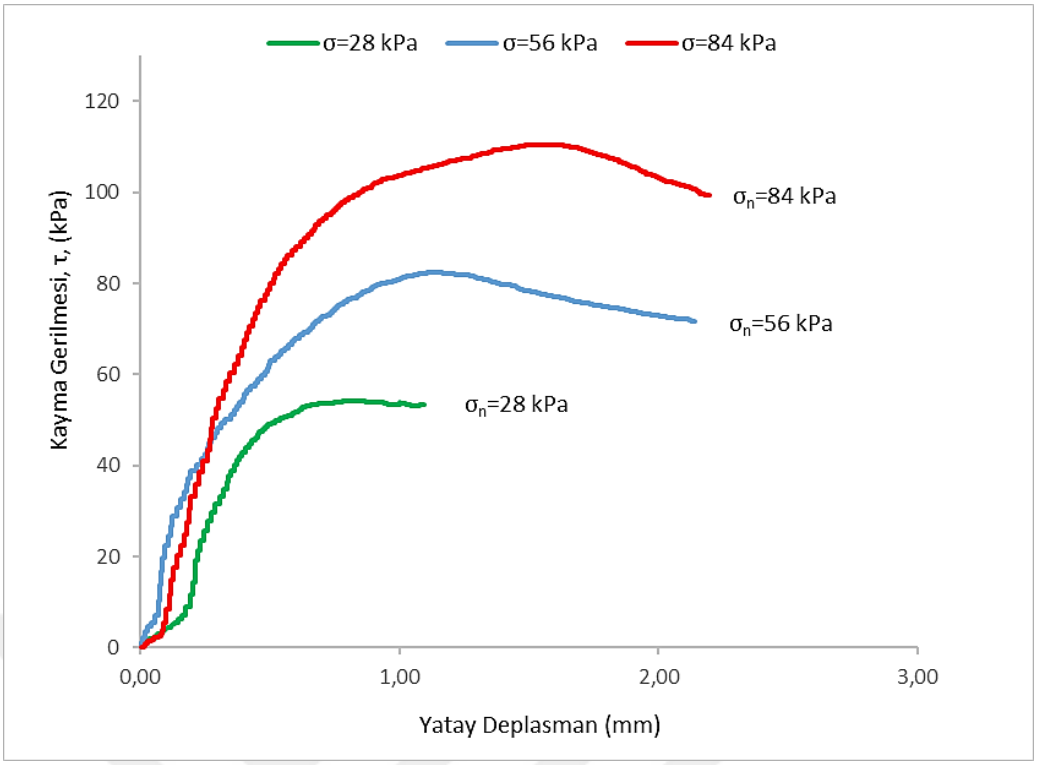
%10 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı serilere ait kayma gerilmesi-yatay deplasman grafikleri Şekil 4.40, Şekil 4.42, Şekil 4.44, Şekil 4.46, Şekil 4.48'de; kırılma zarfları ise Şekil 4.41, Şekil 4.43, Şekil 4.45, Şekil 4.47, Şekil 4.49'da gösterilmektedir.



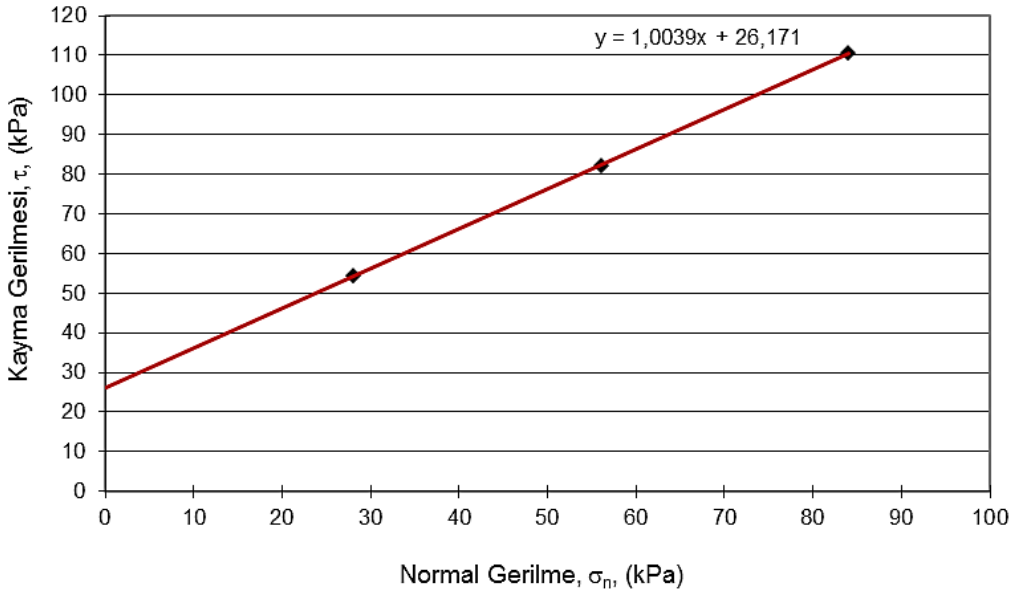
Şekil 4.40. %10 çimento ve %0 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği.



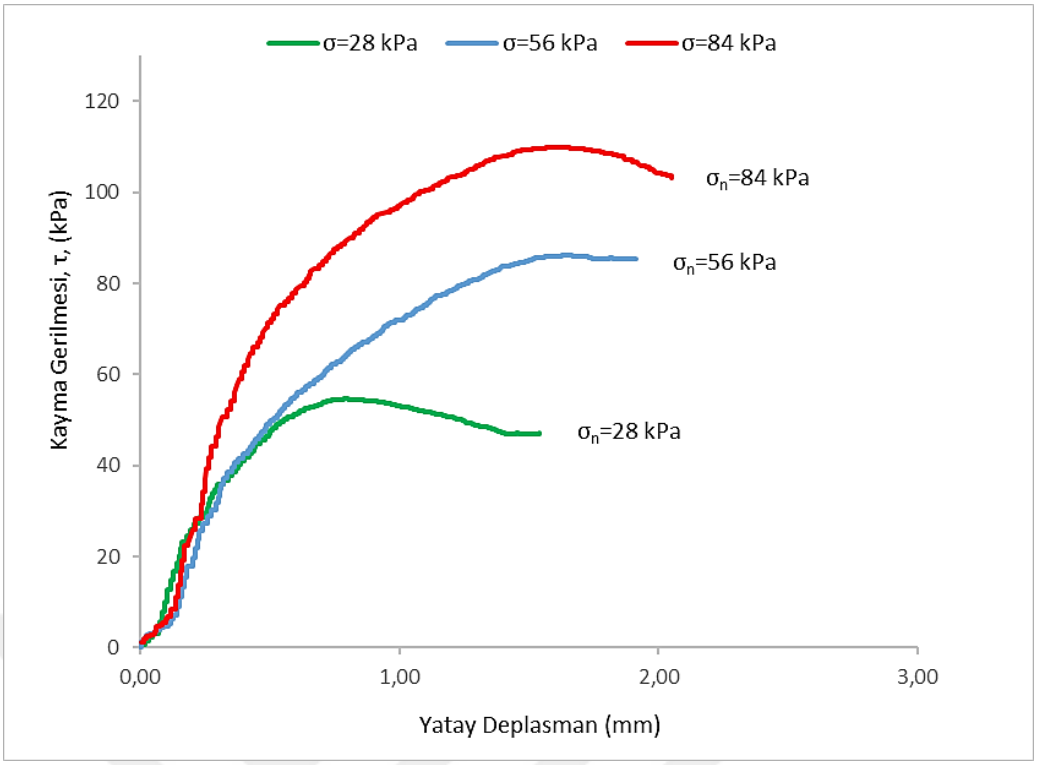
Şekil 4.41. %10 çimento ve %0 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı.



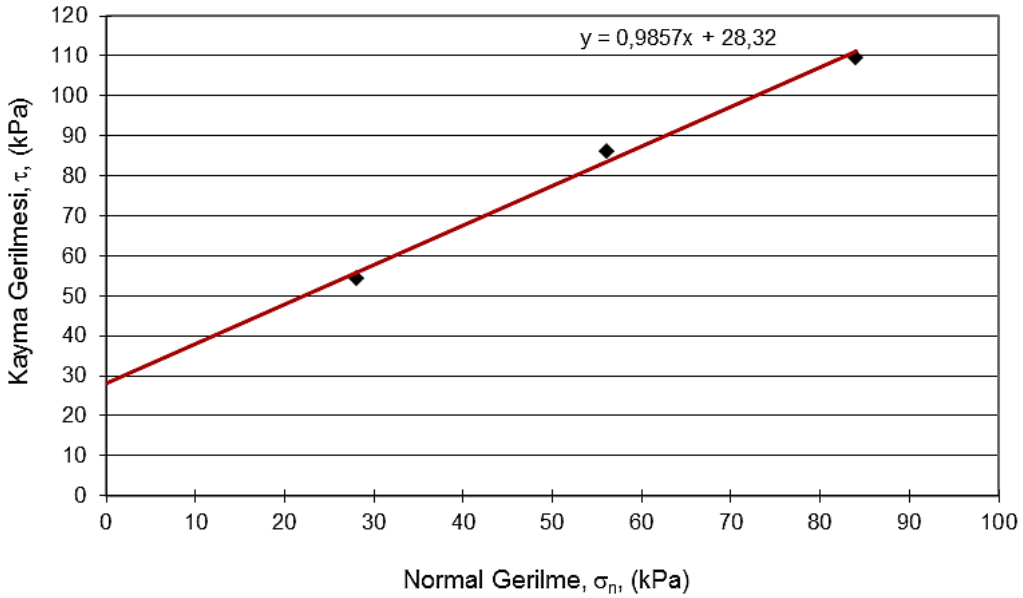
Şekil 4.42. %10 çimento ve %1 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği.



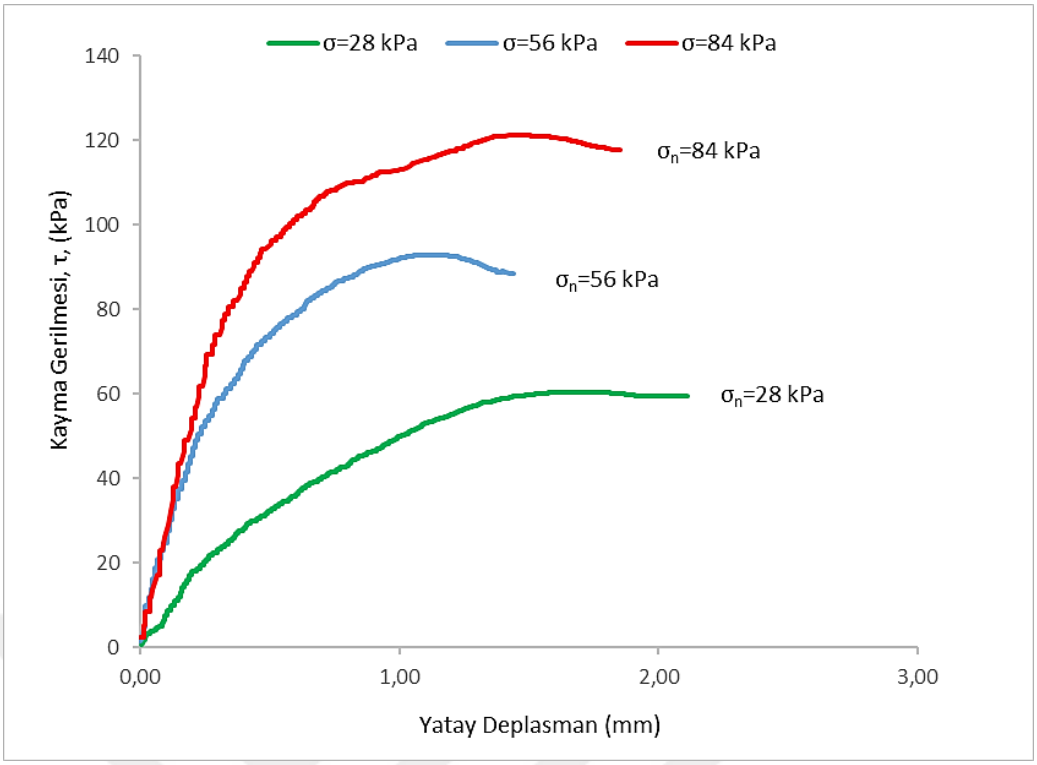
Şekil 4.43. %10 çimento ve %1 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı.



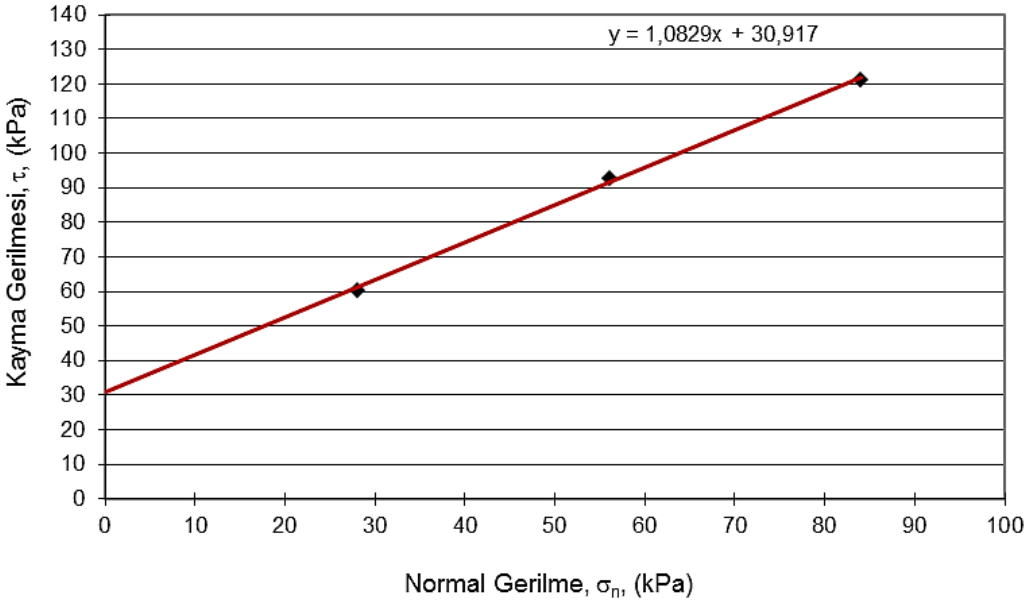
Şekil 4.44. %10 çimento ve %2 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği.



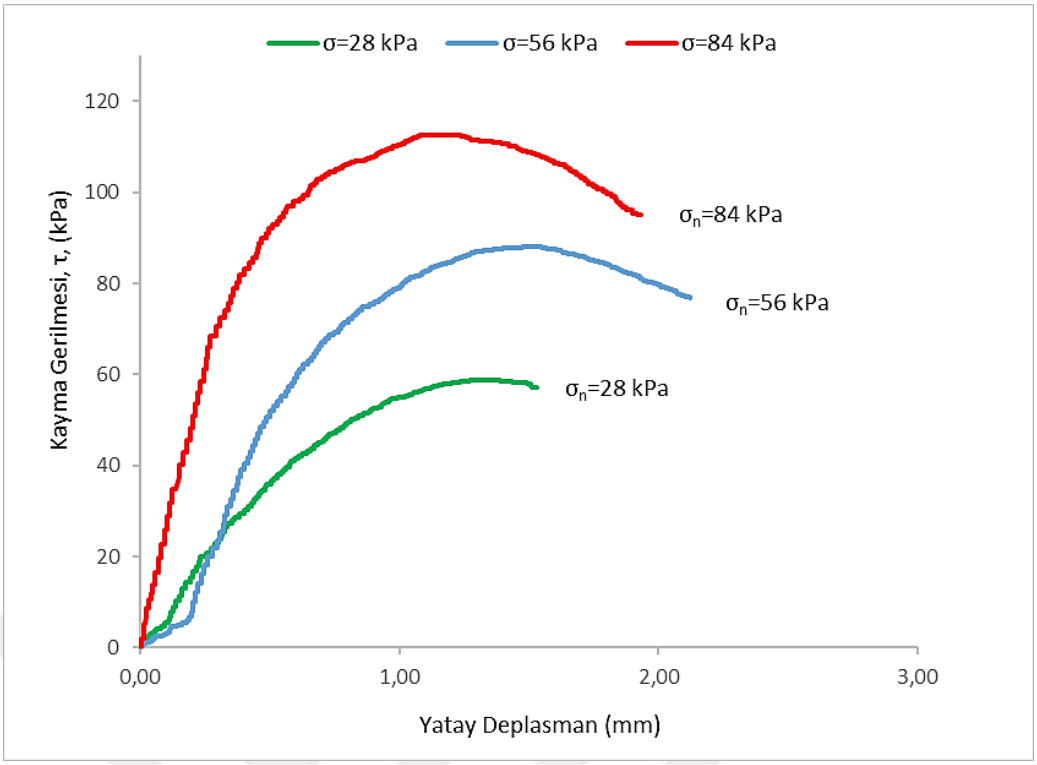
Şekil 4.45. %10 çimento ve %2 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı.



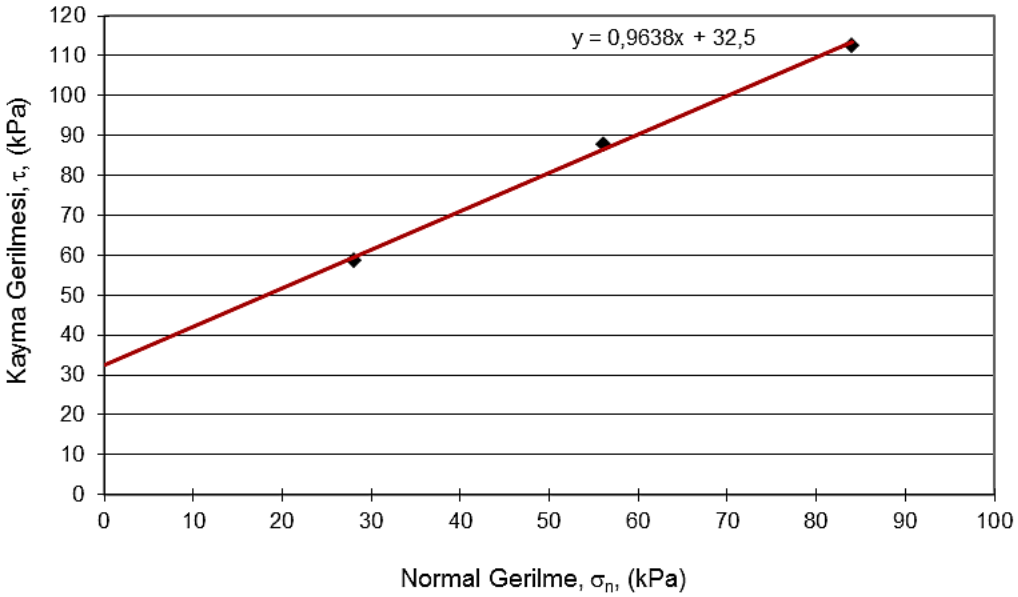
Şekil 4.46. %10 çimento ve %3 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği.



Şekil 4.47. %10 çimento ve %3 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı.



Şekil 4.48. %10 çimento ve %4 bazalt fiber katkılı numunenin kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiği.



Şekil 4.49. %10 çimento ve %4 bazalt fiber katkılı numunenin kırılma zarfı.

Tüm serilerin kesme kutusu deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, maksimum kayma dayanımı açısından optimum katkı oranlarının çimento için %10, bazalt fiber için ise %3 olduğu görülmektedir. 84 kPa normal gerilme altında maksimum kayma dayanımı 54,22 kPa'dan 121,17 kPa'a kadar artmış ve yaklaşık %123 oranında bir artış

göstermiştir. İçsel sürtünme açısı değerleri %10 çimento katkısına kadar yükselme eğilimi göstermekteyken, çimento oranı ağırlıkça %10'a çıkarıldığında bu değerlerin sabit kaldığı veya düştüğü gözlenmiştir. Deney sonuçları, optimum çimento ve bazalt fiber katkısı ile birlikte kum zeminin içsel sürtünme açısının 32°'den 48°'ye kadar çıkabildiğini ortaya koymaktadır. Maksimum içsel sürtünme açısı 48° olarak hesaplanmış olup bu değere %5 çimento katkısının olduğu %3 ve %4 fiber katkılı serilerde ulaşılmıştır. Kohezyon ise katkısız numunede 1,76 kPa olarak hesaplanmışken, %10 çimento ve %4 fiber katkılı numunede 32,50 kPa ile en büyük değerine ulaşmıştır.

4.4. SERBEST BASINÇ DENEYİ SONUÇLARI

Düzce Üniversitesi Zemin Mekaniği laboratuvarında hazırlanarak 14 ve 28 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç deneyleri gerçekleştirilen numunelerin deney öncesi hesaplanan su muhtevaları ve birim hacim ağırlıkları Çizelge 4.13'te sunulmuştur.

Çizelge 4.13. Numunelerin birim hacim ağırlığı ve su muhtevası değerleri.

Numune Serisi	Yaş Birim Hacim Ağırlığı (γ_n) (kN/m^3)	Su Muhtevası (w) (%)	Kuru Birim Hacim Ağırlığı (γ_k) (kN/m^3)
0C0F	19,29	15,0	16,77
0C1F	19,22	15,1	16,70
0C2F	19,10	14,9	16,62
0C3F	18,73	14,6	16,34
0C4F	18,64	14,9	16,22
2,5C0F	19,46	15,1	16,91
2,5C1F	19,27	15,0	16,77
2,5C2F	19,12	14,4	16,72
2,5C3F	18,86	14,3	16,50
2,5C4F	18,50	13,8	16,27
5C0F	19,88	14,7	17,35
5C1F	19,56	14,1	17,14
5C2F	19,28	14,0	16,91
5C3F	19,17	14,6	16,73
5C4F	18,89	13,6	16,63

Çizelge 4.13 (devam). Numunelerin birim hacim ağırlığı ve su muhtevası değerleri.

10C0F	20,04	13,8	17,61
10C1F	19,81	14,1	17,36
10C2F	19,51	14,0	17,11
10C3F	19,10	13,5	16,81
10C4F	19,02	13,3	16,79

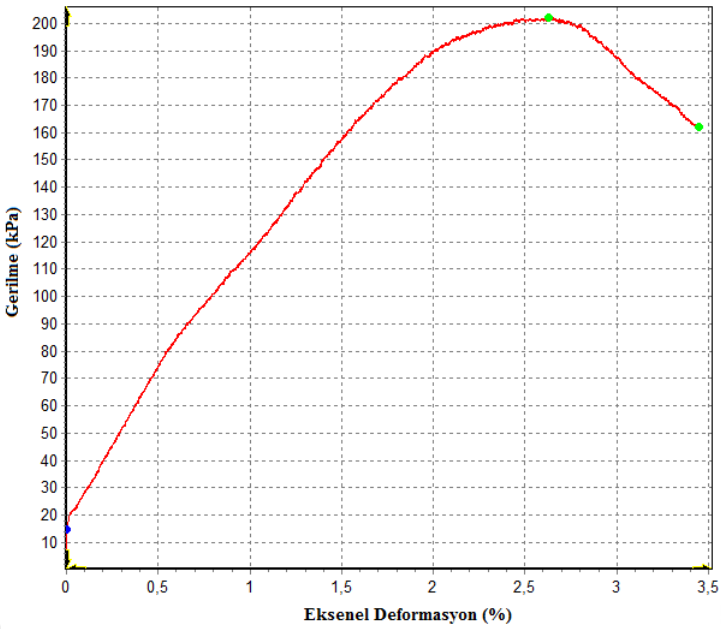
Çizelge 4.13 incelendiğinde artan çimento katkısıyla birlikte zemin numunelerinin birim hacim ağırlıklarında sürekli bir artış gözlenmektedir. Ancak, artan fiber katkısı, numunelerin birim hacim ağırlıklarını düşürmektedir.

Ortalama basınç dayanımı değerleri, numunelerin geometrisinin ($h/d \geq 2$) koşuluna uymamasından ötürü normalden büyük çıktığından, bu değerler, dönüştürücü faktörü olan "1,10"a bölünerek gerçek ortalama basınç dayanımı değerleri tespit edilmiştir.

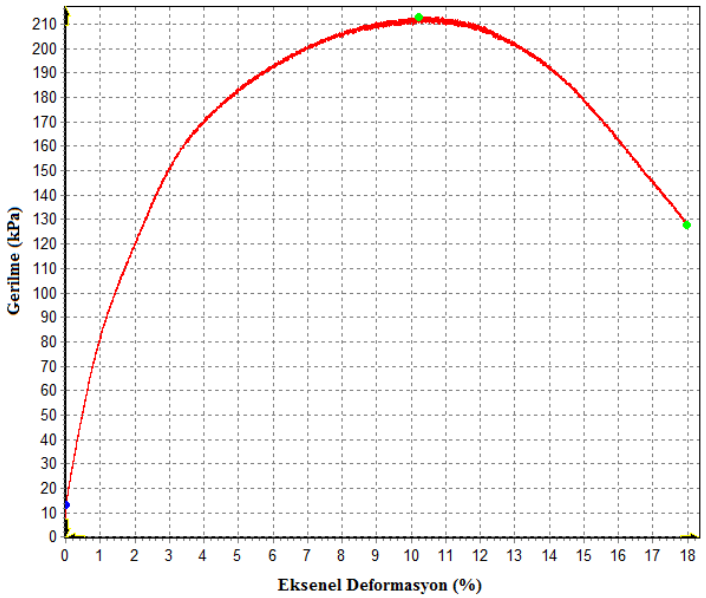
Şekil 4.49'da %0 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı serilere ait 14 ve 28 günlük ortalama serbest basınç dayanımı değerleri gösterilmektedir. Şekil 4.50 ve Şekil 4.51'de ise 28 günlük kür süresi sonunda deneye tabi tutulan numunelerden katkısız seri ile %0 çimento ve %4 fiber katkılı serinin gerilme-deformasyon grafiklerine yer verilmiştir.



Şekil 4.50. %0 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin ortalama basınç dayanımları.



Şekil 4.51. Katkısız numunenin gerilme-deformasyon grafiği (28 gün).



Şekil 4.52. %0 çimento ve %4 fiber katkılı numunenin gerilme-deformasyon grafiği (28 gün).

Çimento katkısının olmadığı numunelerin serbest basınç dayanımları incelendiğinde artan bazalt lif katkısının hem 14 günlük hem de 28 günlük serbest basınç dayanımını arttırdığı görülmektedir. Katkısız numuneler ile %4 fiber katkılı numunelerin ortalama serbest basınç dayanımı kıyaslandığında bu artışın, 14 günlük basınç dayanımında %13 oranında, 28 günlük basınç dayanımında ise %11 oranında olduğu hesaplanmıştır. En yüksek basınç dayanımı değeri 14 gün kür uygulanmış numunelerde 164,1 kPa olarak %4 fiber katkısına sahip numunede ölçülmüşken, 28 günlük basınç dayanımı değerleri

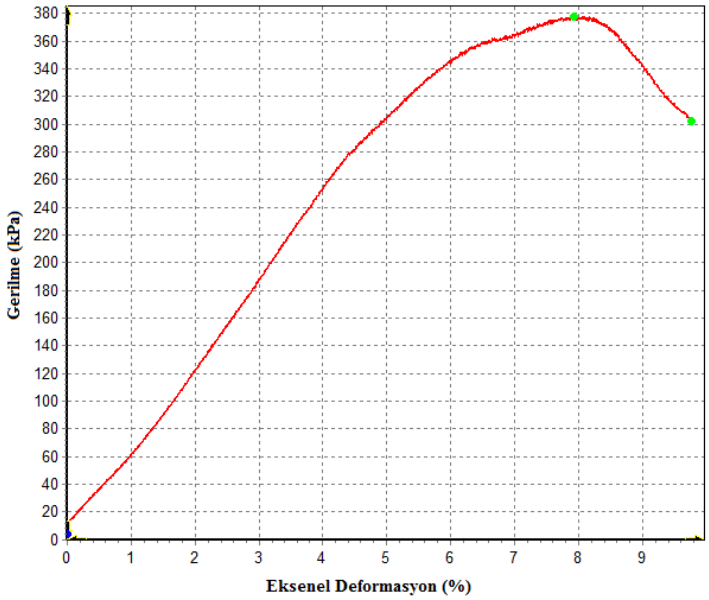
kıyaslandığında en yüksek dayanıma 198,5 kPa değeriyle %4 fiber katkılı numunede erişilmiştir.

Şekil 4.52'de %2,5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı serilere ait 14 ve 28 günlük ortalama serbest basınç dayanımı değerleri gösterilmektedir. Şekil 4.53 ve Şekil 4.54'te ise 28 günlük kür süresi sonunda deneye tabi tutulan numunelerden %2,5 çimento ve %0 fiber katkılı seri ile %2,5 çimento ve %4 fiber katkılı serinin gerilme-deformasyon grafiklerine yer verilmiştir.

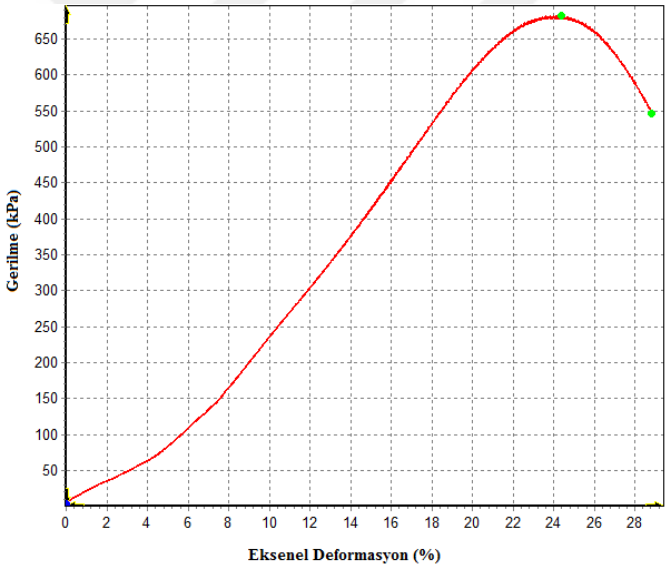


	14 GÜN	28 GÜN
2,5C0F	266,49	372,12
2,5C1F	279,23	424,85
2,5C2F	379,01	466,32
2,5C3F	489,79	560,12
2,5C4F	588,42	634,35

Şekil 4.53. %2,5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin ortalama basınç dayanımları.



Şekil 4.54. %2,5 çimento ve %0 fiber katkılı numunenin gerilme-deformasyon grafiği (28 gün).



Şekil 4.55. %2,5 çimento ve %4 fiber katkılı numunenin gerilme-deformasyon grafiği (28 gün).

Çimento katkı oranının %2,5 olduğu numunelerin serbest basınç dayanımları incelendiğinde artan bazalt lif katkısının hem 14 günlük hem de 28 günlük serbest basınç dayanımını arttırdığı görülmektedir. Fiber katkısız numuneler ile %4 fiber katkılı numunelerin ortalama serbest basınç dayanımı kıyaslandığında bu artışın, 14 günlük basınç dayanımında %121 oranında, 28 günlük basınç dayanımında ise %70 oranında olduğu hesaplanmıştır. En yüksek basınç dayanımı değeri 14 gün kür uygulanmış numunelerde 588,42 kPa olarak %4 fiber katkısına sahip numunede ölçülmüşken, 28

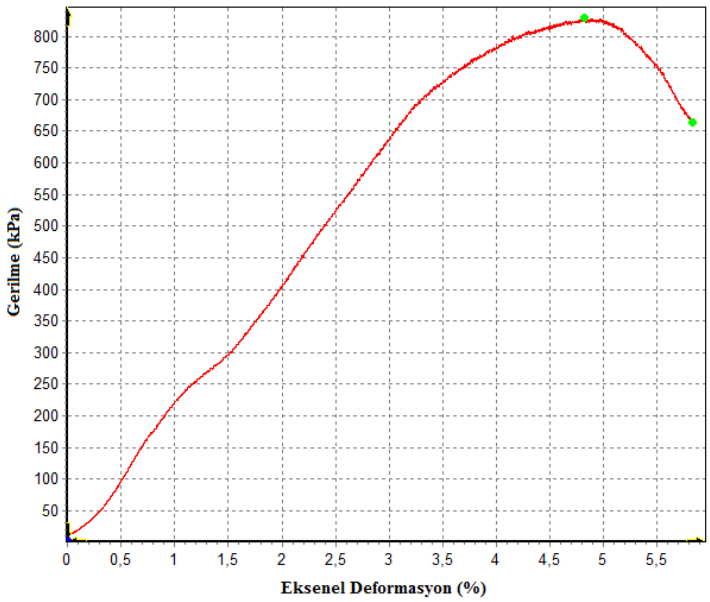
günlük basınç dayanımı değerleri kıyaslandığında en yüksek dayanıma 634,35 kPa değeriyle yine %4 fiber katkılı numunede ulaşılmıştır.

Şekil 4.55'te %5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı serilere ait 14 ve 28 günlük ortalama serbest basınç dayanımı değerleri gösterilmektedir. Şekil 4.56 ve Şekil 4.57'de ise 28 günlük kür süresi sonunda deneye tabi tutulan numunelerden %5 çimento ve %0 fiber katkılı seri ile %5 çimento ve %4 fiber katkılı serinin gerilme-deformasyon grafiklerine yer verilmiştir.

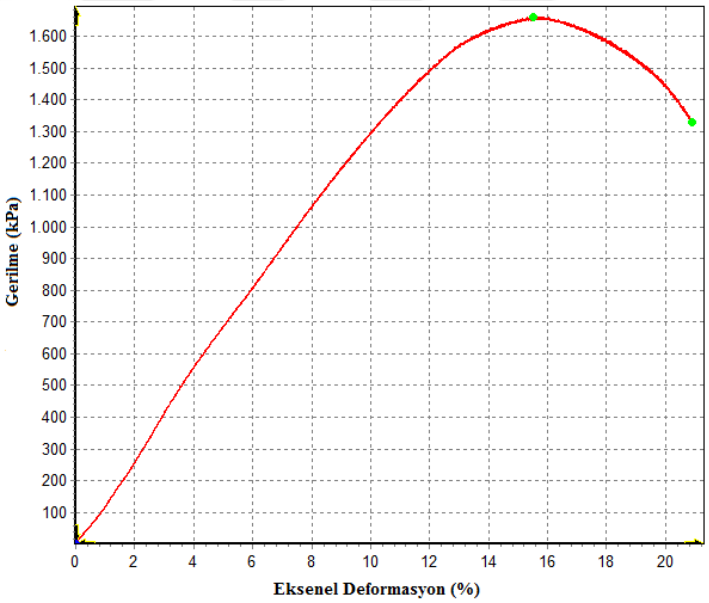


	14 GÜN	28 GÜN
5C0F	637,47	762,79
5C1F	836,99	950,33
5C2F	989,55	1340,20
5C3F	1093,09	1388,41
5C4F	1310,27	1626,29

Şekil 4.56. %5 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin ortalama basınç dayanımları.



Şekil 4.57. %5 çimento ve %0 fiber katkılı numunenin gerilme-deformasyon grafiği (28 gün).



Şekil 4.58. %5 çimento ve %4 fiber katkılı numunenin gerilme-deformasyon grafiği (28 gün).

%5 çimento katkılı numunelerin serbest basınç dayanımları incelendiğinde artan bazalt lif katkısının 14 ve 28 günlük serbest basınç dayanımını arttırdığı gözlenmiştir. Fiber katkısız numuneler ile %4 fiber katkılı numunelerin ortalama serbest basınç dayanımı kıyaslandığında bu artışın, 14 günlük basınç dayanımında %106 oranında, 28 günlük basınç dayanımında ise %113 oranında olduğu hesaplanmıştır. En yüksek basınç dayanımı değeri 14 gün kür uygulanmış numunelerde 1310,27 kPa olarak %4 fiber

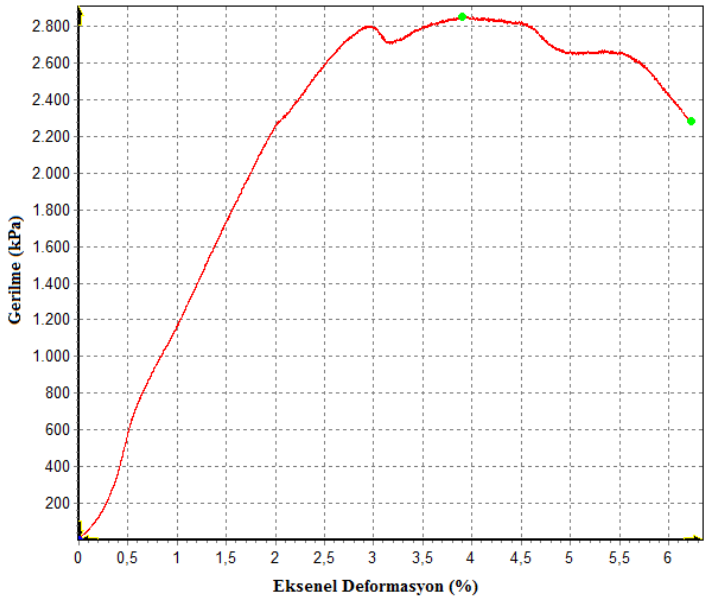
katkısına sahip numunede ölçülmüşken, 28 günlük basınç dayanımı değerleri kıyaslandığında en yüksek dayanıma 1626,29 kPa değeriyle yine %4 fiber katkılı numunede ulaşılmıştır.

Şekil 4.58'de %10 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı serilere ait 14 ve 28 günlük ortalama serbest basınç dayanımı değerleri gösterilmektedir. Şekil 4.59 ve Şekil 4.60'ta ise 28 günlük kür süresi sonunda deneye tabi tutulan numunelerden %10 çimento ve %0 fiber katkılı seri ile %10 çimento ve %4 fiber katkılı serinin gerilme-deformasyon grafiklerine yer verilmiştir.

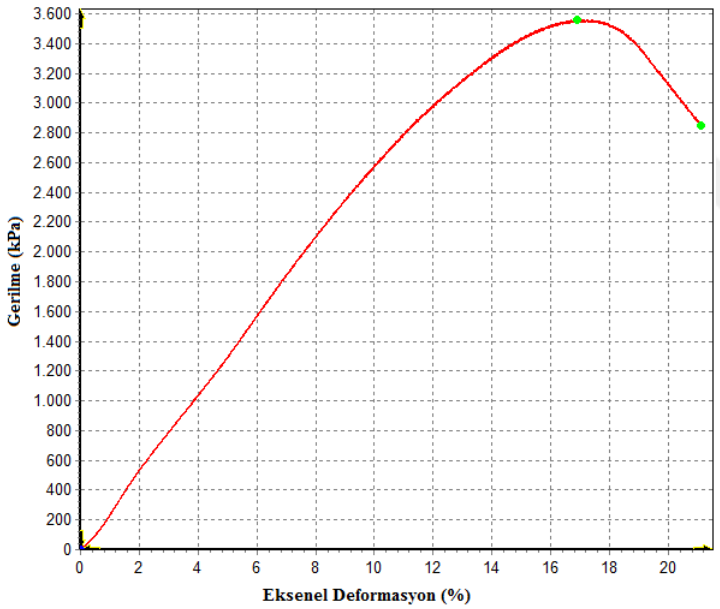


	14 GÜN	28 GÜN
10C0F	2697,18	2851,67
10C1F	2737,68	2924,67
10C2F	2886,17	2989,47
10C3F	2956,21	3041,82
10C4F	3178,36	3232,20

Şekil 4.59. %10 çimento ve değişen oranlarda bazalt fiber katkılı numunelerin ortalama basınç dayanımları.



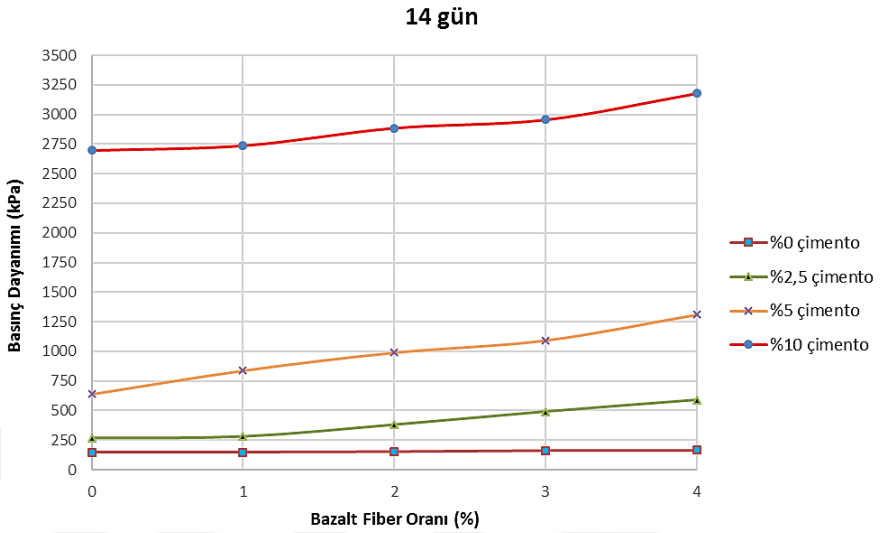
Şekil 4.60. %10 çimento ve %0 fiber katkılı numunenin gerilme-deformasyon grafiği (28 gün).



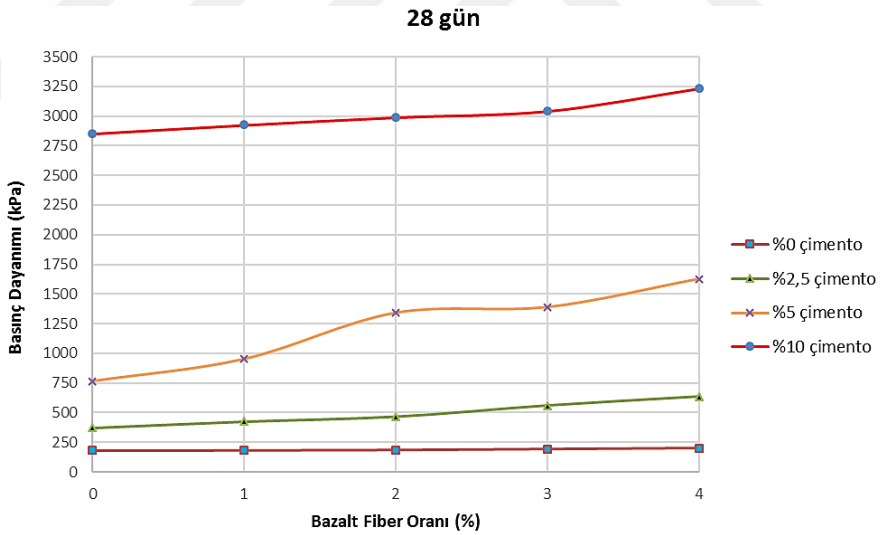
Şekil 4.61. %10 çimento ve %4 fiber katkılı numunenin gerilme-deformasyon grafiği (28 gün).

%10 çimento katkılı numunelerin serbest basınç dayanımları incelendiğinde artan bazalt lif katkısının 14 ve 28 günlük serbest basınç dayanımını arttırdığı ancak bu artışın %2,5 ve %5 oranında çimento katkılı numunelere kıyasla çok daha düşük kaldığı sonucuna ulaşılmaktadır. Fiber katkısız numuneler ile %4 fiber katkılı numunelerin ortalama serbest basınç dayanımı kıyaslandığında bu artışın, 14 günlük basınç dayanımında %18 oranında, 28 günlük basınç dayanımında ise %13 oranında olduğu hesaplanmıştır. En

yüksek basınç dayanımı değeri 14 gün kür uygulanmış numunelerde 3178,36 kPa olarak %4 fiber katkısına sahip numunede ölçülmüşken, 28 günlük basınç dayanımı değerleri kıyaslandığında en yüksek dayanıma 3232,20 kPa değeriyle yine %4 fiber katkılı numunede erişilmiştir.



Şekil 4.62. Tüm serilerin 14 günlük serbest basınç dayanımı.



Şekil 4.63. Tüm serilerin 28 günlük serbest basınç dayanımı.

Şekil 4.62 ve Şekil 4.63'te gösterilmiş olan, tüm serilerin 14 ve 28 günlük serbest basınç deneyi sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, en yüksek basınç dayanımı beklenildiği üzere %10 çimento katkılı numunelerde ölçülmüş olup bu değere 28 günlük kür süresi sonunda %10 çimento ve %4 fiber katkılı numunede ulaşılmıştır. Çimento ve bazalt fiber katkısının, kum zeminin basınç dayanımını önemli ölçüde artırarak 179,4 kPa'dan 3232,20 kPa'a çıkarttığı görülmektedir.

5. TARTIŞMA

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar, literatürde çimento ve/veya fiber katkılı zemin iyileştirmesi üzerine daha önce yapılan bazı çalışmaların sonuçları ile karşılaştırıldığında genel olarak benzerlik göstermektedir.

Sukontasukkul ve Jamsawang, killi zeminlere %10, %15 ve %20 oranında çimento ve değişen oranlarda çelik ve propilen lif katmak suretiyle gerçekleştirdikleri çalışmada serbest basınç dayanımının, çimento katkı oranının artmasıyla artış gösterdiğini ancak zemin-çimento karışımına fiber ilavesiyle birlikte numunelerin daha sünek davranış gösterdiğini ifade etmişlerdir [2]. Serbest basınç dayanımı değerleri ise bu tez çalışmasındaki değerlere kıyasla daha düşük seviyelerde kalmaktadır.

Starcher ve Liu'nun yaptıkları çalışma, sadece çimento katkısının olduğu zemine naylon fiber eklenerek zeminin sadece eksenel yükleme ile kırılması esnasında zeminin daha sünek bir davranış gösterdiğini ortaya koyarak bu tez çalışmasındaki sonuçlarla uyum göstermektedir [25].

Kenan ve Özocak, %1-%3 oranında bazalt fiber katkılı siltli zemin numuneleri üzerinde kesme kutusu deneyini uyguladıkları çalışmada optimum bazalt lif katkısının %1,5 olduğu sonucuna ulaşırken, bu tez çalışmasında çimento içermeyen numunelerin kesme kutusu deneyi sonuçları optimum bazalt fiber oranının %3 olduğunu göstermektedir [26].

Ayyappan ve diğ., polipropilen lifin uçucu kül eklenmiş siltli zeminin taşıma gücüne etkisi üzerine yaptıkları çalışmada CBR deneyleri sonucunda optimum fiber oranının %1 olduğunu ortaya koymuşlardır [27]. Bu sonuç, tüm numune serilerinde maksimum CBR değerini veren bazalt lif oranının %1 olduğu bu tez çalışmasıyla benzerlik göstermektedir.

Zhuang ve Yu, kireç ve bazalt fiber ile güçlendirilmiş şişen zeminlerin mukavemet karakteristiklerini araştırdıkları çalışmalarında sünekliğin bazalt fiber katkısıyla, serbest basınç dayanımının ise kireç katkısıyla artış gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Araştırmacıların, zeminin mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesinde bazalt liflerin baskın rol oynadığını ifade ettikleri çalışmaları [38]; serbest basınç dayanımında çimentonun, zeminin sünek davranış göstermesinde ise bazalt fiberin baskın rol oynadığı bu tez çalışmasıyla benzerlik göstermektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bazalt fiber ve çimento katkısının sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerin geoteknik özelliklerine olan etkisini araştırmak amacıyla Düzce ili Gölyaka yerleşim yeri sınırları içinden temin edilen doğal kum zeminin fiziksel özellikleri ve zemin sınıfı belirlendikten sonra katkısız ve çimento ile bazalt fiber katkılı kum zemin numuneleri üzerinde; kompaksiyon, CBR, direkt kesme kutusu ve serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Deneylerden elde edilen veriler ve bu veriler üzerinde yapılan değerlendirmeler neticesinde aşağıda belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır.

Kompaksiyon deneylerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesi neticesinde;

- Artan çimento oranıyla birlikte zemin numunelerinin maksimum kuru birim hacim ağırlığında artış olduğu ancak fiber oranındaki artışın maksimum kuru birim hacim ağırlığını azalttığı,
- Maksimum kuru birim hacim ağırlığındaki bu artışların çimentonun yoğunluğunun kumun yoğunluğundan yüksek olmasından; azalmaların ise fiber malzemenin özgül ağırlığının kumun özgül ağırlığına kıyasla daha düşük olmasından kaynaklanabileceği,
- Maksimum kuru birim hacim ağırlığının 16,22 kN/m^3 ile 17,64 kN/m^3 arasında değişim gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

CBR deneylerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesi neticesinde;

- Çimento oranının artmasıyla birlikte CBR değerlerinde sürekli bir artışın olduğu ancak fiber katkısının zemin numunelerinin taşıma gücüne etkisinin düzensiz bir seyir izlediği,
- CBR değerlerinin çimento katkısı ile birlikte artmasının, çimentonun bağlayıcı özelliğinden ve çimento katkılı zemin numunelerinin kür süresi sonunda sertleşerek rijit bir duruma gelmesinden kaynaklanabileceği,
- En düşük ve en yüksek CBR değerleri karşılaştırıldığında katkı malzemeleriyle güçlendirilmiş kum zeminin taşıma gücünde 17 kata varan artışların olduğu,

- Zemin taşıma gücü açısından, ağırlıkça %10 oranında çimento ve %1 oranında bazalt fiber katkılı numune serisinin optimum karışım oranlarına sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Kesme kutusu deneylerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesi neticesinde;

- Artan oranlardaki çimento ve bazalt fiber katkısının kum zemin numunelerinin maksimum kayma dayanımını artırdığı ve bu artışın %123 seviyesine kadar çıkabildiği,
- Maksimum kayma dayanımı açısından optimum katkı oranlarının çimento için %10, bazalt fiber için ise %3 olduğu,
- Kayma dayanımındaki artışların çimento ile birlikte zemine katılan bazalt fiberin yüksek çekme dayanımına sahip olmasından kaynaklanabileceği,
- Çimento katkısının olmadığı serilere ait grafikler incelendiğinde kayma direncinde belirgin bir pik noktasının olmadığı ve zemin numunelerinin, gevşek kumların ve normal konsolide kil zeminlerin davranışına benzer özellik gösterdiği,
- Çimento katkılı serilere ait grafikler incelendiğinde ise kayma mukavemetinde pik noktasının daha belirgin bir hal aldığı ve yenilme sonrası kayma direncinde ani düşüşlerin gözlenerek zemin numunelerinin, sıkı kum ve aşırı konsolide kil zeminlerin davranışına benzer özellik gösterdiği,
- Bazalt fiber ve çimento katkısı ile birlikte kum zeminin içsel sürtünme açısının 32°'den 48°'ye kadar çıkabildiği,
- Kum zeminin kohezyon değerlerinde özellikle yüksek oranlardaki çimento katkısıyla birlikte artış meydan geldiği, katkısız numuneye kıyasla kohezyonun 30,74 kPa arttığı ve bu artışların çimentonun bağlayıcı özelliğinden dolayı çimento-zemin karışımının daneleri arasındaki çekim kuvvetinin kaynaklanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Serbest basınç deneylerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesi neticesinde;

- Çimento ve bazalt fiber oranlarındaki artışın zemin numunelerinin ortalama basınç dayanımlarında sürekli bir artışa sebep olduğu ve basınç dayanımının beklenildiği üzere %10 çimento katkılı numunede maksimum değerine ulaştığı,

- İlave bazalt fiber katkısının, etkisini daha ziyade %2,5 ve %5 çimento oranına sahip numunelerde gösterdiği, %0 ve %10 çimento katkılı numunelerin serbest basınç dayanımları incelendiğinde artan bazalt lif katkısının basınç dayanımını arttırdığı ancak bu artışın %2,5 ve %5 oranında çimento katkılı numunelere kıyasla çok daha düşük kaldığı,
- Numunelerin kırılma mekanizmaları ve gerilme-deformasyon grafikleri incelendiğinde bazalt fiber katkısının, çimento-zemin karışımı numunelerin yenilme sürelerini ve yenilme anına kadar oluşan eksenel deformasyonunu artırarak çimento katkılı zeminlerin gevrek kırılma davranışını sünekleştirdiği,
- Fiber katkısına sahip numunelerin yenilme anında ve sonrasındaki görünümleri incelendiğinde, numune içerisinde birbiri ile bağıntılı, fiber katkısız numunelere kıyasla daha ince ve sayıca fazla olan çatlakların olduğu ve fiber liflerin, bu çatlaklar arasında köprü görevi görerek numunelerin dağılmasını önlediği,
- En yüksek basınç dayanımına 28 günlük kür süresi sonunda %10 çimento ve %4 fiber katkılı numunede ulaşılırken, çimento ve bazalt fiber katkısıyla birlikte kum zeminin 28 günlük basınç dayanımının ciddi oranda artarak 179,4 kPa'dan 3232,20 kPa değerine çıktığı,
- Basınç dayanımının bu denli yüksek değerlere ulaşmasının, güçlendirilmiş zeminde sonradan yapılması gerekebilecek olası bir kazı işleminde zorlukların yaşanmasına sebep olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Deney sonuçlarından elde edilen bilgiler ışığında çimento ve bazalt fiber katkısının sıvılaşma potansiyeli olan kum zeminlerin geoteknik özelliklerini iyileştirdiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Ancak bir inşaat projesinin geliştirilmesi aşamasında güvenlik ve sağlamlık öncüllerinden sonra, uygulanacak projenin ekonomik olması da dikkate alınmalıdır. Bu bağlamda, güçlendirme yapılması gereken zemin tabakasının geoteknik özellikleri iyi tayin edilerek, çimento ve bazalt fiberin zeminle karıştırılması yöntemiyle yapılabilecek zemin güçlendirmesinin, iyileştirme çıktılarının ve maliyet analizinin diğer zemin iyileştirme yöntemleri ile karşılaştırılması ve sonuçların değerlendirilmesi sonrasında tercih edilebileceği düşünülmektedir.

7. KAYNAKLAR

[1] S. L. Kramer, *Geotechnical Earthquake Engineering*, 1st ed., New Jersey, USA: Prentice Hall, 1996, pp. 348-524.

[2] P. Sukontasukkul and P. Jamsawang, "Use of steel and polypropylene fibers to improve flexural performance of deep soil-cement column," *Construction and Building Materials*, vol. 29, no. 1, pp. 201-205, 2012.

[3] S. M. Hejazi, M. Sheikhzadeh, S. M. Abtahi and A. Zadhoush, "A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 30, pp. 100-116, 2012.

[4] K. Ishihara, "Stability of natural deposits during earthquakes," in *11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, USA, 1985, pp. 321-376.

[5] G. Castro, "On the behavior of soils during earthquakes-liquefaction," *Developments in Geotechnical Engineering*, vol. 42, pp. 169-204, 1987.

[6] H. B. Seed and K. L. Lee, "Liquefaction of saturated sands during cyclic loading," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, vol. 92, no. 6, pp. 105-134, 1966.

[7] O. Öztürk, "Fiber katkılarının temiz kum zeminlerin dinamik davranışlarına etkisi," Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2018.

[8] R. Ulusay, "Zemin sıvılaşması," *Mavi Gezegen Popüler Yerbilimleri Dergisi*, s. 2, ss. 47-56, 2000.

[9] K. Ö. Çetin ve B. Unutmaz, "Zemin sıvılaşması ve sismik zemin davranışı," *Türkiye Mühendislik Haberleri*, s. 430, ss. 32-37, 2004.

[10] R. A. Green and K. Ziotopoulou, "Overview of screening criteria for liquefaction triggering susceptibility," in *10th Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Sydney, Australia, 2015.

[11] T.C. Ulaştırma Bakanlığı. (2018, 24 Ekim). *Geoteknik tasarım esasları* [Online]. Erişim: http://www.yildiz.edu.tr/~wwwhid/TR/files/dnzprj/DLH_Geoteknik_Tasarim_Esaslari.pdf.

[12] B. B. Broms, "Deep compaction of granular soils," in *Foundation Engineering Handbook*, 2nd ed., Boston, USA: Springer, 1991, pp. 814-832.

[13] H. Alparslan, "Sıvılaşma potansiyeline sahip zeminlerde iyileştirme yöntemlerine ait kriterlerin belirlenmesi," Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2006.

[14] F. G. Bell, *Engineering Treatment of Soils*, 1st ed., London, England: E&FN Spon, 1993, pp. 54-141.

[15] H. Çetin. (2018, 27 Ekim). *Zemin ıslah yöntemleri* [Online]. Erişim:

https://docplayer.biz.tr/47697721-Zemin-islah-yontemleri-prof-dr-hasan-cetin.html.

[16] B. B. Ayraçma, "Sentetik fiber ve çimento katkılı kumların mukavemet özellikleri," Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2015.

[17] F. Tunçdemir, "Temel zeminlerinin enjeksiyon tekniğiyle iyileştirilmesi," *Türkiye Mühendislik Haberleri*, s. 430, ss. 59-64, 2004.

[18] H. Demir, "Taş kolon ve geopier uygulaması ile zemin iyileştirmesi," Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2007.

[19] Ü. Akkaş, "Sıvılaşma potansiyeli ve etkilerinin azaltılması," Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2006.

[20] D. A. Bruce, "An introduction to the deep soil mixing methods as used in geotechnical applications," U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, USA, Rep. FHWA-RD-99-138, 2000.

[21] Sonar Sondaj. (2018, 12 Aralık). *Deep mixing (derin karıştırma)* [Online]. Erişim: http://www.sonarsondaj.com/derin_karistirma.html.

[22] S. Littlejohn, "The development of practice in permeation and compensation grouting: a historical review (1802–2002): part 1 permeation grouting," in *Third International Conference on Grouting and Ground Treatment*, New Orleans, USA, 2003, pp. 50-100.

[23] B. M. Das, *Principles of Geotechnical Engineering*, 7th ed., Stamford, USA: Cengage Learning, 2011, pp. 616-629.

[24] B. A. Uzuner, *Temel Mühendisliğine Giriş*, 3. baskı, Trabzon, Türkiye: Derya Kitabevi, 2006, ss. 261-274.

[25] R. Starcher and C. Liu, "Mechanical behavior of cement and cement-fiber-improved soft soils," *Geo-Congress 2013*, San Diego, USA, 2013, pp. 2048-2057.

[26] A. Kenan ve A. Özocak, "Bazalt fiber katkısının siltli zeminlerin kayma direncine etkisi," in *2nd International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management*, Sakarya, Türkiye, 2018, ss. 918-924.

[27] S. Ayyappan, K. Hemalatha and M. Sundaram, "Investigation of engineering behavior of soil, polypropylene fibers and fly ash -mixtures for road construction," *International Journal of Environmental Science and Development*, vol. 1, no. 2, pp. 171-175, 2010.

[28] A. Ateş, "Mechanical properties of sandy soils reinforced with cement and randomly distributed glass fibers (GRC)," *Composites Part B*, vol. 96, pp. 295-304, 2016.

[29] J. Qu, D. Zhao and B. Li, "Effect of random inclusion of palm fibers on strength characteristics of Shanghai cohesive soil," *Advanced Materials Research*, vol. 1096, pp. 572-581, 2015.

[30] T. Eskişar, E. Karakan and S. Altun, "Effects of fibre reinforcement on liquefaction behaviour of poorly graded sands," *Procedia Engineering*, vol.161, pp.538-542, 2016.

[31] P. Dayakar, K. S. Kumar and K. V. Raman, "Study on improvement of CBR strength of clay using polypropylene fiber," *International Journal of Pure and Applied*

Mathematics, vol. 119, no. 12, pp. 8529-8539, 2018.

[32] L. Gao, G. Hu, N. Xu, J. Fu, C. Xiang and C. Yang, "Experimental study on unconfined compressive strength of basalt fiber reinforced clay soil," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2015, pp. 1-8, 2015.

[33] N. C. Consoli, P. D. M. Prietto and L. A. Ulbrich, "Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 124, no. 12, pp. 1211-1214, 1998.

[34] S. Mali and B. Singh, "Strength behaviour of cohesive soils reinforced with fibers," *International Journal of Civil Engineering Research*, vol. 5, no. 4, pp. 353-360, 2014.

[35] M. Segetin, K. Jayaraman and X. Xu, "Harakeke reinforcement of soil-cement building materials: Manufacturability and properties," *Building and Environment*, vol. 42, no. 8, pp. 3066-3079, 2007.

[36] C. P. Ndepete ve S. Sert, "Silt zeminin drenajsız kayma direncinin bazalt fiber katkısı ile artırılması," *7. Geoteknik Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 2017, ss. 437-448.

[37] M. H. Maher and D. H. Gray, "Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers," *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 116, no. 11, pp. 1661-1677, 1990.

[38] X. Zhuang and X. Yu, "Experimental study on strength characteristics of lime-basalt fiber reinforced expansive soil," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 744, pp. 495-498, 2015.

[39] T. Özdemir, G.E. Polat, Ö. Azdeniz, A. Boz ve A. Sezer, "Bazalt fiber ve kireç ile güçlendirilmiş kil zeminin dayanım özellikleri," *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi,* Erzurum, Türkiye, 2016, ss. 1025-1034.

[40] T. Yetimoğlu and Ö. Salbaş, "A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fiber," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 21, no. 2, pp. 103-110, 2003.

[41] S. Akbulut, S. Arasan and E. Kalkan, "Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers," *Applied Clay Science*, vol. 38, pp. 23-32, 2007.

[42] B. B. Ayraçma ve B. Teymür, "Fiber katkılı kumların geoteknik özellikleri," *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 15. Ulusal Kongresi*, Ankara, Türkiye, 2014, ss. 593-602.

[43] N. C. Consoli, M. A. Vendruscolo, A. Fonini and F. D. Rosa, "Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 27, no. 3, pp. 196-203, 2009.

[44] P. G. Gisymol and K. Ramya, "A study on the effect of basalt fiber in organic soil," *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 14, no. 4, pp. 13-17, 2017.

[45] *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System),* ASTM D2487, 2006.

[46] H. Tsuchida, "Prediction and countermeasure against liquefaction in sand deposits," in *Proceedings of the Seminar of the Port and Harbour Research Institute*, Yokosuka, Japan, 1970, pp. 1-3.

[47] S. Elshafie and G. Whittleston, "A review of the effect of basalt fibre lengths and

proportions on the mechanical properties of concrete," *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 458-465, 2014.

[48] A. B. Kızılkanat, N. Kabay, V. Akyüncü and G. Erdoğan, "Basalt fibers and mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete," *Sigma Journal of Engineering & Natural Sciences*, vol. 32, no. 4, pp. 444-452, 2014.

[49] T. Deák and T. Czigány, "Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibres a comparison," *Textile Research Journal*, vol. 79, no. 7, pp. 645-651, 2009.

[50] B. A. Uzuner, *Temel Zemin Mekaniği*, 6. baskı, Trabzon, Türkiye: Derya Kitabevi, 2005, böl. 7, ss. 162-177.

[51] *Standard Test Methods for Moisture-Density Relations of Soil-Cement Mixtures*, ASTM D558, 1996.

[52] M. Aytekin, *Deneysel Zemin Mekaniği*, 2. baskı, Ankara, Türkiye: Teknik Yayınevi, 2004, ss. 321-334.

[53] *Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils*, ASTM D1883, 2014.

[54] T. W. Lambe and R. V. Whitman, *Soil Mechanics*, New York, USA: John Wiley & Sons, 1969, pp. 116-121.

[55] K. H. Head, *Manual of Soil Laboratory Testing*, 2nd ed., vol. 2, New York, USA: John Wiley & Sons, 1994, pp. 189-267.

[56] *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*, ASTM D3080, 2011.

[57] *Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders*, ASTM D1633, 2000.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Uğur Mahir TÜRKEL

Doğum Tarihi ve Yeri : 20.11.1981 / İstanbul

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : umturkel@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2015
Lise	Fen Bilimleri	Burak Bora Anadolu Lisesi	1999