

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SENTETİK FİBER VE ÇİMENTO KATKILI KUMLARIN MUKAVEMET
ÖZELLİKLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bahattin Berk AYRAÇMA

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

ARALIK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SENTETİK FİBER VE ÇİMENTO KATKILI KUMLARIN MUKAVEMET
ÖZELLİKLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Bahattin Berk AYRAÇMA
(501121324)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Berrak TEYMÜR

ARALIK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501121324 Nnumaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Bahattin Berk AYRAÇMA, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “Sentetik Fiber ve Çimento Katkılı Kumların Mukavemet Özellikleri” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Berrak TEYMÜR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : 25 Kasım 2015
Savunma Tarihi : 25 Aralık 2015

Aileme,

ÖNSÖZ

Her zaman yanımda olan aileme, başta danışmanlığımı yapan Yrd. Doç. Dr. Berrak Teymür olmak üzere tüm İstanbul Teknik Üniversitesi Geoteknik birimi öğretim üyeleri ve yardımcılara, Zemin Mekaniği laboratuvarlarında görevli Müh. Tek. İsmail Cantekin ve Tek. Şemsettin Mert'e, deneylerde kullanılan malzemelerin teminindeki yardımlarından dolayı Doç. Dr. Hasan Yıldırım'a, Yapı Malzemesi laboratuvar çalışanlarına ve yakın çevremdeki arkadaşlarıma tüm yardım ve desteklerinden dolayı teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Aralık 2015

Bahattin Berk Ayraçma
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ....	1
2. ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ	5
2.1 Arazi Kompaksiyonu	5
2.2 Ön-Yükleme	6
2.3 Vibroflotasyon	7
2.4 Patlatma.....	7
2.5 Jet Grout	8
2.6 Kum Drenler.....	8
2.7 Dinamik Kompaksiyon	9
2.8 Zemin Dondurma	10
2.9 Geosentetik Kullanımı	10
2.10 Çimento İle Stabilite	11
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	13
3.1 Zeminlerin Kayma Gerilmeleri Altındaki Davranışı	13
3.1.1 Elastik modeller	16
3.1.1.1 Lineer elastik.....	16
3.1.1.2 Non-Lineer elastik.....	17
3.1.2 Plastik modeller.....	17
3.1.2.1 Mohr-Coulomb modeli	17
3.1.3 Kaba daneli zeminlerin kayma mukavemeti ve kayma altındaki davranışı	20
3.2 Konuyla İlgili Önceki Çalışmalar	22
3.3 Fiber Katkılı Zemin Matrisi Üzerine Analitik Çalışmalar	29
4. YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	35
4.1 Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler.....	35
4.1.1 Kum.....	35
4.1.2 Çimento	37
4.1.3 Fiber	38
4.2 Deneysel Çalışmalar	40
4.2.1 Kesme kutusu deneyleri	40
4.2.1.1 Silika kum ve cam Fiber kullanılarak gerçekleştirilen deneyler	43
4.2.1.2 Akpınar kumu ve PP fiber kullanılarak gerçekleştirilen deneyler	50

4.2.2 Serbest basınç deneyleri	61
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	69
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR.....	77
EKLER.....	79
ÖZGEÇMİŞ.....	107

KISALTMALAR

ACI	: American Concrete Institute
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CBR	: California bearing ratio
EN	: Avrupa standardı
PP	: Polypropylene
PPF	: Polypropylene fiber
SP	: Kötü derecelenmiş
TS	: Türk Standardı
USCS	: Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi

SEMBOLLER

ΔS_R	: Fiberden kaynaklı mukavemet artışı
a	: Zemin ve fiber arası adhezyon terimi
c	: Kohezyon
c'	: Efektif kohezyon
D_r	: Rölatif sıkılık
e	: Boşluk oranı
E	: Young Modülü
e_{maks}	: En büyük boşluk oranı
e_{min}	: En küçük boşluk oranı
G	: Kayma Modülü
i	: Fiber oryantasyon açısı
N	: Normal kuvvet
q_u	: Serbest basınç dayanımı
S_{eq}	: Fiber katkılı zeminin eşdeğer kayma mukavemeti
SP	: Kötü derecelenmiş
t	: Fiber lifleri tarafından paylaşılan kayma gerilmesi
T	: Kesme kuvveti
T_{10}	: 10x10 cm boyutlarındaki kesme kutusundan okunan kesme kuvveti
T_6	: 6x6 cm boyutundaki kesme kutusundan okunan kesme kuvveti
τ_R	: Mobilize fiber kayma gerilmesi
α	: Fiberlerin açısına bağlı ampirik bir katsayı
γ	: Birim hacim ağırlık
γ_k	: Kuru birim hacim ağırlık
γ_s	: Dane birim hacim ağırlığı
ϵ_x	: x ekseninde şekil değiştirme
ϵ_y	: y ekseninde şekil değiştirme
η	: Fiber boy/çap oranı
σ_1	: Büyük asal gerilme
σ_2	: Küçük asal gerilme
σ_x	: x eksenindeki normal gerilme
σ_y	: y eksenindeki normal gerilme
τ_{xz}	: z ekseninde, x eksenine dik düzlemdeki kayma gerilmesi
τ_{zx}	: x ekseninde, z eksenine dik düzlemdeki kayma gerilmesi
ν	: Poisson oranı
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
ϕ'	: Efektif içsel sürtünme açısı
ϕ_{cr}	: Kritik içsel sürtünme açısı
ϕ_{maks}	: Pik içsel sürtünme açısı
ϕ_μ	: Gerçek içsel sürtünme açısı
χ	: Zemindeki hacimsel fiber oranı
ψ	: Dilatasyon açısı
ω	: Su muhtevası

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Doğal fiberin elde edildiği bitkiler ve sentetik fiber çeşitleri (Hejazi vd., 2012)'den uyarlanmıştır.	2
Çizelge 2.1 : Zemin tipine göre çimento katkılı zeminlerin tipik serbest basınç dayanım aralıkları (Bell, 1993)'den uyarlanmıştır.	12
Çizelge 3.1 : Fiber donatılı ve donatısız numunelerin farklı çimento oranlarına göre mukavemet parametreleri (Consoli vd., 2009).	24
Çizelge 4.1 : Deneylerin ilk aşamasında kullanılan ince silika kuma ait çeşitli fiziksel özellikler.	35
Çizelge 4.2 : Deneylerin ikinci aşamasında kullanılan Akpınar kumuna ait çeşitli fiziksel özellikler.	36
Çizelge 4.3 : CEM II çimentosuna ait özellikler.	38
Çizelge 4.4 : Masterfiber 15 MF ve cam fiber katkısına ait özellikler.	39
Çizelge 4.5 : Kesme kutusu boyutlarının içsel sürtünme açısına etkisi.	42
Çizelge 4.6 : Serbest basınç deneyi numunelerinin karışım oranları.	62
Çizelge 5.1 : Silika kum ve cam fiber kullanılan numunelerin içsel sürtünme açısı değerleri.	70
Çizelge 5.2 : Akpınar kumu ve PP fiber kullanılan numunelerin içsel sürtünme açısı değerleri.	71
Çizelge 5.3 : 7 günlük serbest basınç deneyi numunelerine ait özellikler.	72
Çizelge 5.4 : 28 günlük serbest basınç deneyi numunelerine ait özellikler.	73
Çizelge 5.5 : Farklı karışım oranları için 7 ve 28 günlük ortalama serbest basınç dayanımı değerleri.	74

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Arazi kompaksiyonunda kullanılan araç ve ekipmanlar (http://www.dimolanka.com/images/compaction.jpg).....	6
Şekil 2.2 : Yüksek katlı yapı inşaatı öncesi sahada önyüklemeye çalışması (http://www.intracorp.ca/riverparkplace/river-park-place-construction-series/).	6
Şekil 2.3 : Vibrofloat tekniğinin adımları (http://www.menard-web.com/internetmenard.nsf/html/vibroflotation_en.html).	7
Şekil 2.4 : Jet Grout uygulamasına ait betimleme (http://www.ffgb.be/Franki/media/Franki_Media/).	8
Şekil 2.5 : Ön yükleme ve kum drenlerin birlikte kullanımı (http://www.sunlyengineering.com/).	9
Şekil 2.6 : Bir kıyı dolgusunun dinamik kompaksiyon ile sıkıştırılması (http://www.menard-web.com/Appli/intranet/referencesms.nsf/).	9
Şekil 2.7 : Şaft kuyusu açımında zemin dondurma (http://www.moretrench.com/services/ground-freezing/).	10
Şekil 2.8 : Geosentetiklerin geoteknik mühendisliğindeki çeşitli kullanım alanları (Handbook of Geosyntetics, 2002)’den uyarlanmıştır.	11
Şekil 3.1 : İki boyutlu düzlemde normal ve kayma gerilmeleri (Craig, 2004).	14
Şekil 3.2 : Basitleştirilmiş malzeme modelleri, (Craig, 2004)’ten uyarlanmıştır: (a) Elastik – Tam Plastik. (b) Elastik – Pekleşme ve Elastik – Yumuşama. (c) Rijit.	16
Şekil 3.3 : Doğrusal ve eğrisel Coulomb kırılma zarfı (Budhu, 2010).	18
Şekil 3.4 : Mohr dairesi ve farklı kesitlerdeki gerilme halleri (https://en.wikipedia.org/wiki/Mohr%27s_circle).	19
Şekil 3.5 : Mohr-Coulomb kırılma zarfı (Budhu, 2010).	19
Şekil 3.6 : Kaba daneli zeminlerin kayma mukavemeti karakteristikleri (Craig, 2004).	21
Şekil 3.7 : a) Çeşitli oranlarda fiber katkılı kum numunelerin kırılma zarfları, b) %0.5 oranında fiber içeren numunelerin kayma gerilmesi – yer değiştirme davranışındaki değişim (Yetimoğlu ve Salbas, 2002).	23
Şekil 3.8 : %0.5 fiber oranında ve farklı çimento dozajlarındaki kum numunelerin artık gerilme – eksenel deformasyon – hacimsel deformasyon grafikleri (Consoli vd., 2009).	24
Şekil 3.9 : %0 – 1,0 fiber oranı, %3 çimento oranındaki %50 ve 70 sıklıktaki numunelerin gerilme – deformasyon ve hacimsel değişim grafikleri (Hamidi ve Hooresfand, 2013).	25
Şekil 3.10 : Çimento ve fiber oranının katkılı kum numunelerin serbest basınç dayanımına etkisi (Parto ve Kalantari, 2012).	26
Şekil 3.11 : Fiber miktarının (fiber alan oranının) kayma mukavemetine etkisi (Gray ve Ohashi, 1983).	27
Şekil 3.12 : Sıklığın fiber katkılı kum numunelerin kayma davranışına etkisi (Gray ve Ohashi, 1983).	28

Şekil 3.13 : Fiber liflerinin oryantasyon açısının kırılma zarfına etkisi (Gray ve Ohashi, 1983).	28
Şekil 3.14 : Fiber katkılı zeminlerde, mobilize fiber liflerinin kayma mukavemetine katkısı (Li ve Zornberg, 2013)'den uyarlanmıştır.	30
Şekil 3.15 : Pullout deney düzeneği (ASTM D6706, 2001).	32
Şekil 3.16 : Pullout deney düzeneğindeki yükleme gömleği detayı (ASTM D6706, 2001).	32
Şekil 3.17 : Teorik zemin-fiber matris modelinin deneysel çalışmalarla karşılaştırılması: (a) %0,2 ve %0,4 fiber oranlarına göre. (b) 25 ve 50 mm fiber boyutlarına göre.	33
Şekil 3.18 : Kayma durumundaki fiberin deformasyonu ve mobilize çekme direnci (Gray ve Ohashi, 1983): (a) Kayma düzlemine dik. (b) Kayma düzlemiyle "i" açısı yapan.	34
Şekil 4.1 : Deneyler sırasında kullanılan silika kum ve Akpınar kumu.	36
Şekil 4.2 : Deneylerin ilk aşamasında kullanılan ince silika kuma ait dane çapı dağılım eğrisi.	36
Şekil 4.3 : Deneylerin ikinci aşamasında kullanılan Akpınar kumuna ait dane çapı dağılım eğrisi.	37
Şekil 4.4 : Kum malzemenin 10 numaralı elekten elenmesi.	37
Şekil 4.5 : Kesme kutusunun şematik gösterimi (ASTM D3080, 2003).	41
Şekil 4.6 : Kesme kutusu boyutlarının içsel sürtünme açısına etkisi (Cerato ve Lutenegeger, 2006).	42
Şekil 4.7 : 6x6 ve 10x10 cm ölçülerindeki kesme kutularının a) gevşek b) sıkı numunelerin kırılma zarfı üzerindeki etkisi.	43
Şekil 4.8 : %20 sıklıkta katkısız numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.	44
Şekil 4.9 : %20 sıklıkta katkısız numunelerin pik kırılma zarfları.	44
Şekil 4.10 : %60 sıklıkta katkısız numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.	45
Şekil 4.11 : %60 sıklıkta katkısız numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.	45
Şekil 4.12 : %20 sıklıkta ve %0,25 fiber oranına sahip numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.	46
Şekil 4.13 : %20 sıklıkta ve %0,25 oranında fiber katkılı numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.	46
Şekil 4.14 : %20 sıklıkta ve %0,50 fiber oranına sahip numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.	47
Şekil 4.15 : %20 sıklıkta ve %0,50 oranında fiber katkılı numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.	47
Şekil 4.16 : %60 sıklıkta ve %0,25 fiber oranına sahip numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.	48
Şekil 4.17 : %60 sıklıkta ve %0,25 oranında fiber katkılı numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.	49
Şekil 4.18 : %60 sıklıkta ve %0,50 fiber oranına sahip numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.	49
Şekil 4.19 : %60 sıklıkta ve %0,50 oranında fiber katkılı numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.	50
Şekil 4.20 : Kesme kutusu deney düzeneği.	51
Şekil 4.21 : Fiber katkılı numunelerin deney sonundaki görünüşü: (a) Kırılma sonrası görünüşü ve (b) Kayma yüzeyi detayı.	52
Şekil 4.22 : %20 sıklıkta katkısız numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.	53

Şekil 4.23 : %20 sıklıkta katkısız numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları	53
Şekil 4.24 : %60 sıklıkta katkısız numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.	54
Şekil 4.25 : %60 sıklıkta katkısız numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.	54
Şekil 4.26 : %20 sıklıkta ve %0,25 fiber oranına sahip numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.	55
Şekil 4.27 : %20 sıklıkta ve %0,25 fiber oranına sahip numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.	55
Şekil 4.28 : %20 sıklıkta ve %0,50 fiber oranına sahip numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.	56
Şekil 4.29 : %20 sıklıkta ve %0,50 fiber oranına sahip numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.	56
Şekil 4.30 : %20 sıklıkta ve %1,0 fiber oranına sahip numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.	57
Şekil 4.31 : %20 sıklıkta ve %1,0 fiber oranına sahip numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.	58
Şekil 4.32 : %60 sıklıkta ve %0,25 fiber oranına sahip numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.	58
Şekil 4.33 : %60 sıklıkta ve %0,25 fiber oranına sahip numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.	59
Şekil 4.34 : %60 sıklıkta ve %0,50 fiber oranına sahip numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.	59
Şekil 4.35 : %60 sıklıkta ve %0,50 fiber oranına sahip numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.	60
Şekil 4.36 : %60 sıklıkta ve %1,0 fiber oranına sahip numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.	60
Şekil 4.37 : %60 sıklıkta ve %1,0 fiber oranına sahip numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.	61
Şekil 4.38 : Numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra: (a) Deney öncesi desikatörlerde bekletilmesi. (b) Serbest basınç düzeneğinde kırılması.	61
Şekil 4.39 : Kalıp çıkarma süresinin kısa tutulması durumunda numunenin kırılması.	62
Şekil 4.40 : Çalışmalar sırasında kullanılan numune ile dolu kalıplar: (a) 10x20 cm boyutlarında. (b) 5x10 cm boyutlarında.	64
Şekil 4.41 : Kuru kum ağırlığınca %5,0 çimento oranına sahip farklı fiber katkı oranlarına sahip numunelerin 7 günlük serbest basınç direnci grafikleri.	65
Şekil 4.42 : Kuru kum ağırlığınca %10,0 çimento oranına sahip farklı fiber katkı oranlarına sahip numunelerin serbest basınç direnci grafikleri.	65
Şekil 4.43 : Kuru kum ağırlığınca %15,0 çimento oranına sahip farklı fiber katkı oranlarına sahip numunelerin 7 günlük serbest basınç direnci grafikleri.	66
Şekil 4.44 : Kuru kum ağırlığınca %5,0 çimento oranına sahip farklı fiber katkı oranlarına sahip numunelerin 28 günlük serbest basınç dayanımı grafikleri.	67
Şekil 4.45 : Kuru kum ağırlığınca %10,0 çimento oranına sahip farklı fiber katkı oranlarına sahip numunelerin 28 günlük serbest basınç dayanımı grafikleri.	67
Şekil 4.46 : Kuru kum ağırlığınca %15,0 çimento oranına sahip farklı fiber katkı oranlarına sahip numunelerin 28 günlük serbest basınç dayanımı grafikleri.	68

Şekil 4.47 : Fiberli numunelerin kırılma mekanizmasına örnekler.	68
Şekil 5.1 : Çeşitli cam fiber katkı oranlarının silika kumun sürtünme açısına etkisi.	70
Şekil 5.2 : Çeşitli PP fiber katkı oranlarının Akpınar kumunun sürtünme açısına etkisi.	71
Şekil 5.3 : Çimento ve fiber katkılı numunelerin zamana bağlı dayanım değişimi. ..	74
Şekil A.1 : 5-0-4 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	80
Şekil A.2 : 5-0-5 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	80
Şekil A.3 : 5-5-4 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	81
Şekil A.4 : 5-5-3 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	81
Şekil A.5 : 5-10-2 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	82
Şekil A.6 : 5-10-4 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	82
Şekil A.7 : 10-0-1 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	83
Şekil A.8 : 10-0-2 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	83
Şekil A.9 : 10-5-1 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	84
Şekil A.10 : 10-5-2 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	84
Şekil A.11 : 10-10-4 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	85
Şekil A.12 : 10-10-3 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	85
Şekil A.13 : 15-0-2 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	86
Şekil A.14 : 15-0-1 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	86
Şekil A.15 : 15-5-3 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	87
Şekil A.16 : 15-5-1 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	87
Şekil A.17 : 15-10-3 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	88
Şekil A.18 : 15-10-4 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	88
Şekil A.19 : 5-0-1 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	89
Şekil A.20 : 5-0-2 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	89
Şekil A.21 : 5-0-3 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	90
Şekil A.22 : 5-5-2 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	90

Şekil A.23 : 5-5-1 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	91
Şekil A.24 : 5-5-5 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	91
Şekil A.25 : 5-10-5 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	92
Şekil A.26 : 5-10-1 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	92
Şekil A.27 : 5-10-3 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	93
Şekil A.28 : 10-0-5 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	93
Şekil A.29 : 10-0-4 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	94
Şekil A.30 : 10-0-3 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	94
Şekil A.31 : 10-5-3 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	95
Şekil A.32 : 10-5-4 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	95
Şekil A.33 : 10-5-5 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	96
Şekil A.34 : 10-10-1 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	96
Şekil A.35 : 10-10-2 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	97
Şekil A.36 : 10-10-5 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	97
Şekil A.37 : 15-0-3 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	98
Şekil A.38 : 15-0-4 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	98
Şekil A.39 : 15-0-5 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	99
Şekil A.40 : 15-5-2 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	99
Şekil A.41 : 15-5-4 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	100
Şekil A.42 : 15-5-5 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	100
Şekil A.43 : 15-10-1 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	101
Şekil A.44 : 15-10-2 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	101
Şekil A.45 : 15-10-5 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.	102
Şekil B.1 : Silika kum cam fiber karışımı.	103
Şekil B.2 : Akpınar kumu ve PPF malzemeleri.	103
Şekil B.3 : Katkısız kum numunesinin kırılmas sonrası düzenden çıkarılması. ...	103

Şekil B.4 : Numune kalınlığının kontrolü ve düşey deformasyonunun kalibrasyonu.	
.....	104
Şekil B.5 : Farklı çimento oranlarına sahip karışımların hazırlanması ve priz aldıktan sonraki görünüşleri.	104
Şekil B.6 : Serbest basınç numunelerinin kalıpta bekletilmesi, kalıptan çıkarılması ve nem kaybına karşı korunması.	105
Şekil B.7 : Bir kısım numunelere ait kırılma şekilleri.....	105

SENTETİK FİBER VE ÇİMENTO KATKILI KUMLARIN MUKAVEMET ÖZELLİKLERİ

ÖZET

Tez kapsamında, bir zemin iyileştirme yöntemi olarak, kumlu zeminlerde fiber kullanımı araştırılmıştır. Fiber katkılı zeminlerin mukavemet parametrelerinin bulunması ve gerilme şekil değiştirme ilişkilerinin incelenmesi için, İstanbul Teknik Üniversitesi, Hamdi Peynircioğlu Zemin Mekaniği ve Geoteknik laboratuvarlarında bir dizi laboratuvar deneyi yapılmıştır. Deneylerde, öncelikler kullanılacak malzemelerin fiziksel özellikleri tayin edilmiş, sonrasında kayma mukavemeti özellikleriyle ilgili mekanik deneylerden kesme kutusu ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır.

Deneylerde kullanılan ana malzemeler kum, fiber ve çimentodan oluşmaktadır. Bu malzemeler İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Malzemeleri laboratuvarlarından elde edilmiştir. Yapılan çalışmalarda iki farklı kum ve fiber tipi denenmiştir. İlk setlerde temiz silika kum ve cam fiber kullanılmış olup, ardından Akpınar kumu ve BASF firmasının ürünü olan Masterfiber 15 MF kodlu polypropylene fiber seçilmiştir. Sözü edilen malzemeler kullanılarak yapılan kesme kutusu deneylerinin ardından, Akpınar kumu ve PP fiberle hazırlanan karışımlar üzerinde serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Serbest basınç deneyi numunelerine, fiber lifleri ve kum daneleri arasında aderans sağlanması bakımından çimento da eklenmiştir. Çalışmalarda CEM II tipindeki çimento kullanılmıştır.

Kesme kutusu deneylerinde, numuneler, gevşek ve sıkı durumları temsil etmesi açısından, %20 ve %60 rölatif sıklıkta hazırlanmıştır. Kullanılan fiber katkı, kuru kumun ağırlığına oranla karışımlara katılmıştır. Fiber oranı %0,25 - %1,00 arasında değişmektedir.

Serbest basınç deneylerinde, kesme kutusu deney sonuçlarına göre belirlenen iki fiber oranının kullanımı tercih edilmiştir. Çimento oranı ise, literatürde mevcut bulunan çalışmaların ve uygulama projelerinin ışığında belirlenmiştir. Fiber oranı ağırlıkça %0.50 ve 1.00 iken, çimento oranları yine kuru kum ağırlığınca %5,00, 10,00 ve 15,00 olarak seçilmiştir. Tüm karışımların su/çimento oranı sabit tutulmuş ve yeterli işlenebilirlik, kum ve fiber yüzey alanının büyüklüğü düşünülerek %65 olarak belirlenmiştir. Numuneler, kalıptan çıkarıldıktan sonra, nemlendirilmiş ve oda sıcaklığında sabit nemde bekletilmiştir. Deneyler 7. Ve 28. günlerde gerçekleştirilmiştir.

Tezin ilk bölümünde, fiber malzemelere ait genel bilgiler verilmiş, kullanım amaçları ve kullanım alanlarına değinilmiştir. İkinci bölümde, kısaca, sıkça kullanılan zemin iyileştirme yöntemlerinden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde, literatür araştırması sırasında elde edilen bilgilere yer verilmiş, zeminlerin kayma gerilmeleri altındaki davranışı açıklanmış, tez konusuyla ilgili yapılan benzer çalışmalar incelenmiştir. Sonraki kısımda, deneylerde kullanılan malzemeler hakkında bilgi verilmiş ve yapılan deneysel sonuçlardan, uygulama aşamalarından ve karşılaşılan güçlüklerden

bahsedilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen veriler de bu bölümde paylaşılmıştır. Sonuç bölümünde, deney sonrası alınan veriler incelenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Fiber ve çimento katkının, bir zemin iyileştirme yöntemi olarak kullanımı irdelenmiş, sonraki çalışmalar ve olası uygulamalar için önermelerde bulunulmuştur.

Çalışma içeriği incelendiğinde, yalnız fiber katkılı numuneler üzerinde gerçekleştirilen kesme kutusu sonuçları, fiber katkılı zeminlerin pik içsel sürtünme açısının yükseldiğini göstermektedir. Ayrıca, kırılma sonrası mukavemet düşüşü azalmaktadır. Gerilme – şekil değiştirme davranışı incelendiğinde, katkılı karışımların daha plastik bir davranış gösterdiği ve sünekliğin arttığı gözlemlenmiştir. Sözü edilen mukavemet özelliklerindeki gelişim, gevşek numunelerde daha fazla öne çıkmaktadır. Fakat, söz konusu değişimler, silika kum ve cam fiber kullanılarak hazırlanan karışımlarda, Akpınar kumu ve PP fiber içeren karışımlara göre daha az gözle görülür seviyelerdedir. Bu sebepten, çimento içeren karışımların hazırlanışında dane boyu daha büyük ve lif çapı daha küçük olan Akpınar kumu ile PP fiber kullanılmış olup, bu numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapılmıştır. Serbest basınç deneylerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, fiber bulunmayan, yalnız çimento katkılı karışımların dayanımının, fiber ve çimentonun beraber kullanıldığı karışımların üzerinde kaldığı görülmektedir ve dayanım çimento dozajıyla artmaktadır. Bununla birlikte, fiber katkı önceden gevrek olarak nitelendirilebilen davranışı plastik davranışa dönüştürmüş ve numuneler, maksimum basınç değerinin ulaşılmasının ardından da dayanımlarının bir kısmını korumuşlardır.

STRENGTH PROPERTIES OF CEMENTED AND FIBER REINFORCED SANDS

SUMMARY

Geotechnical aspects of any civil engineering application must be investigated for safe design and proper utilization. It's also a crucial necessity to find solutions to the possible engineering problems and for doing mandatory checks regarding to civil engineering, since geotechnical engineering consists one of the initial phases of any structural project.

Some of the common enquiries can be shown as site investigation, determination of soil profile, soil bearing against static and dynamic loadings, elastic and plastic settlements and liquefaction safety. Many aspects of a design like foundation dimensioning, determination of foundation type, solutions to slope stability problems are dependent on these analysis.

It's a fact, that with the increasing urbanization, especially in major cities, available sites open to construction are constantly decreasing. This fact, could lead up to the occurrence of the engineering projects which need to be built on soil profiles with poor engineering properties. It is obvious, that under these circumstances application of the job would be a challenge. Against this challenge, engineer might need to redesign the structural components. For example; foundation system might need to get switched to a deep foundation type like a piled raft foundation, instead of a shallow foundation type, which causes the costs to swing up.

In case of one or many of the controls regarding to geotechnical engineering fail, engineer has to redesign the project to satisfy the safety and economics. Soil improvement is an application to enhance the current soil properties of underlying soil profile. It consists of many stabilisation methods which can be more proper depending on the soil type, project and kind of the problem each of their own. Some of the methods can be named as compaction, drainage, soil alteration and soil reinforcement.

In the scope of the thesis, fiber reinforcement as a soil improvement technique is investigated for sandy soil types. Fiber reinforcement of soils can be defined as producing a soil matrix by inclusion of fibrous material. This application increases the shear strength, reduces the settlements, improves the hydraulic conductivity and drainage conditions with the help of tension bearing capabilities of mobilized fibers. Fibrous materials can be extracted from the nature or they can be produced synthetically.

Laboratory tests are performed to the better knowledge of soil strength and strength behavior as in shear stress – displacement curves. All of the tests are performed in Istanbul Technical University, Hamdi Peynircioglu Soil Mechanics laboratories. Materials used in the tests are gained by the help of the Istanbul Technical University, Building Materials laboratories. Majority of the materials used during the testing can be identified as sand, fiber and cement. Two kinds of sands and fibers are used during the studies, respectively, clean silica sand and Akpınar sand with glass fiber and

polypropylene fiber. The cement type used in the studies is CEM II type according to Turkish standards.

Performed laboratory tests can be defined in two categories. Firstly, physical property tests are done to decide on the physical properties of the material such as relative density, specific gravity and grain size distribution. After the determination of the physical properties, tests regarding mechanical properties of soil are performed. These consist of direct shear tests and unconfined compression tests.

In the first set of mechanical tests, direct shear tests are done by using both sand and fiber types. Different kinds of mixes are produced according to dry weight of the sand. These mixes include a range of fiber ratio of 0.25 to 1.00%. The samples are prepared in loose and dense states to represent different soil conditions, which have a relative density percentage of 20 and 60 respectively.

When glass fiber type reinforcement is used in clean silica sand, fiber ratio of 0.50% of dry sand resulted to be the optimum content for both dense and loose samples. It improved the shear strength of the sand by increasing the friction angle from 34° to 42° for loose samples.

When PP fiber type is used in Akpınar sand, optimum fiber content also turned out to be 0.50% for loose samples. On the other hand, no drastic change in regards to maximum shear stress is seen for dense samples. If the limitation of the shear stress loss after peak value is reached is considered, 1.00% fiber ratio gave better results for loose samples, while 0.50 and 1.00% of fiber content showed similar results for dense samples.

However, while the cost effectiveness and the ability of producing uniformly mixed samples are considered, further experiments are performed by using Akpınar sand and PP fiber.

After gathering the data from the direct shear test results, Akpınar sand and polypropylene fiber type are chosen to be used for the preparation of samples which are used in unconfined compression tests. During the unconfined compression tests, cement is also added into the mixture of sand and fiber to obtain an adhesion between soil particles and fiber threads. Inside the mixtures, two fiber ratios are used, which are 0.50 and 1.00%. Cement ratio is calculated according to dry weight of sand. Cement ratios are selected as 5, 10 and 15%. Fiber ratios are decided by investigating the results of the direct shear tests, while cement ratios are decided upon the literature studies and also examples from the site applications. Water/cement ratio for the mixtures used in the unconfined compression tests are kept constant. By considering the minimum water/cement ratio for hydration of cement, workability of the mixture and high surface area of the sand particles and fiber, water/cement ratio is selected as 65%. After the pouring of the samples, they are kept inside in molds about one day. After demolding, they are kept in a humid place to prevent water loss and tested in a period of 7 and 28 days. The molds used, which had a form of split-spoon, had a height of 100 mm and diameter of 50 mm.

During the experiments, initially, molds cut out from one meter long cylindrical PVC tubes are used. Diameter being 10 cm and their height being 20 cm. However, because of the problems such as; producing uniformly mixed samples, compaction of the samples and getting the samples out of the molds, smaller samples having a diameter of 5 cm with 10 cm height are used later on. Subsequent molds were made of metal

and they were in a type of split spoon, which eliminated the previously mentioned problems.

In the first chapter of the thesis, an overall information about fibers and their usage fields with benefits are given. In the second part, some of the commonly used soil improvement methods are discussed and brief explanations are given. Literature studies are shown in the third chapter to take a look at the general shear behavior of the soils. Past studies done related to the study of the thesis are also stated in this chapter. Following chapter consists of the analysis of the laboratory work and their procedure. In the results section, data gathered from the laboratory tests are investigated and overall statements are made with the general results. The usage of the fiber and cement as a soil investigation method and its benefits are discussed with the recommendations for future work and possible site applications.

Within the great scope of studies, the laboratory test results including direct shear tests show an increase in the peak internal friction angle, when the fiber is used as the only reinforcement without cement. Moreover, decrease of post failure stress loss is reduced and limited with the inclusion of fibers. Also, if the shear stress – displacement plots are investigated, it can be seen, that the soil has become more plastic and has ductile behaviour. However, the improvements stated on the above are less effective for the samples consist of silica sand and glass fiber than samples consist of Akpınar sand and polypropylene fiber. It's acknowledged, that the reasoning behind this situation being, Akpınar sand having larger grain size and polypropylene fibers having a smaller diameter, which results a better and more evenly distributed sand-fiber matrix.

For this reason, Akpınar sand and polypropylene fibers are selected to be used for sample preparation for unconfined compressive strength tests. The results of the unconfined compression tests show, that the cement increases the soil's unconfined compressive strength. On the other hand, strength decreases with the addition of the fibers into the mix. However, while the strength decreases, behavior of the soil becomes more ductile as oppose to the brittle behavior of the cement only samples. It can also be seen, that the soil is kept some of its strength after the maximum value of stress is reached with the inclusion of fibers. When the fiber included samples are investigated, it is observed that the fiber threads were interconnecting the pieces of sample which are separated by cracks, preventing it from collapsing, unlike only cement including samples.

It is also noted, that the samples having a cement ratio of 5%, showing a very brittle behaviour, because of the inadequate bonding of sand particles. Some of the samples even cracking and failing during the unmolding process.

The overall analysis of the data points out, that the optimum fiber content of fiber being about 5%, when glass fiber and silica sand are used. On the other hand, for samples consist of PP fiber and Akpınar sand, 1.00% of fiber gave better results considering post peak behaviour of dense soil samples. Direct shear box tests indicates that the fiber inclusion can lead to an increase in the peak internal friction angle while limiting the shear strength loss after the peak value.

When the unconfined compression test results of the study are investigated, it can be seen, that unconfined compression strength of the material is getting increased with the increased cement ratios. While the inclusion of polypropylene fibers decrease the maximum unconfined compression pressure, they also greatly improve the stress – strain behaviour of the mixtures by turning the brittle behaviour to plastic and producing a ductile curve. It is also observed, that the fiberious material are working

as bridges inside the composite, preventing a total collapse failure and providing improvement against larger displacements of soil. Also ensuring the soil to bear more pressure after the peak value is reached.

1. GİRİŞ

Tüm inşaat mühendisliği projelerinin adımları olan keşif, tasarım, uygulama, kontrol ve işletme aşamalarının güvenli ve başarılı bir şekilde tamamlanabilmesi için, öncelikli olarak, yapılan işle bağlantılı zemin ve geoteknik problemlerinin araştırılması ve gerekli tahkiklerin yapılması gerekmektedir. Bu bağlamda, geoteknik birimini oluşturan zemin incelemesi, zemin profilinin oluşturulması, statik ve dinamik etkenlere yönelik taşıma gücü, oturma, sıvılaşma gibi hesapların yapılması, her proje için büyük önem taşımaktadır.

Yapıların boyutlandırılması, temel sisteminin seçilmesi, stabilite problemlerinin çözümü, mevcut zemin koşullarının durumuna bağlı inceleme ve hesapların yapılmasıyla mümkündür. Gerekli durumlarda yapı sisteminin ve yapı malzemelerinin değiştirilmesi veya mevcut zemin koşullarının iyileştirilmesi yoluna gidilebilmektedir. Tek problemin birden çok çözümünün olabilmesi durumuyla, mühendis, yeter güvenlikteki uygulamayı maliyet, çevre sağlığı gibi açılardan da inceleyip, optimum çözümü bulmak ile yükümlüdür.

Zemin iyileştirmesi zeminlerin mühendislik özelliklerinin geliştirilmesine dayanan bir uygulamadır. Bu uygulama, mevcut zemine katkı yapılması, sıkıştırılması, drenaj şartlarının iyileştirilmesi, başka bir malzeme ile değiştirilmesi şeklinde olabilmektedir. Farklı zemin türlerine ve geoteknik problemlerine göre yıllar boyunca ortaya çıkmış ve geliştirilmiş yöntemler bulunmaktadır.

Özellikle büyük şehirlerde yapılanmanın artması ve nüfusun çoğalmasına takip, imar yönetmelikleri güncellenmekte olup, imara açık proje alanlarının azalması gündemdedir. Bu da, elverişli olmayan ortamlarda yapı ve inşaat projelerinin uygulanma gereğini ortaya çıkarmaktadır. Böyle durumlarda, projelerin imalatında güçlükler oluşmaktadır. Projedeki tasarımın değiştirilmesi ve örneğin kazıklı temel gibi daha karmaşık ve pahalı çözümler yerine, zeminin iyileştirilmesi yöntemi, günümüzde pek çok kere görülmektedir.

Tez kapsamında, bir zemin iyileştirme yöntemi olarak, fiber katkılı zeminler incelenmiş ve katkılı zemin karışımının statik mukavemet özelliklerinin ve gerilme – deformasyon karakteristiklerinin değişimi araştırılmıştır. Fiber katkılı zemin stabilizasyonu doğal veya sentetik olarak bulunabilen, lifli yapıdaki malzemelerin zemin içerisine katılarak, kayma gerilmelerine karşı, çekme kuvvetinin mobilize olmasıyla ve zemin matrisi içerisinde bir ağ kurarak, zeminin taşıma gücü, oturma, hidrolik geçirgenlik, yatay deformasyon gibi özelliklerinin geliştirilmesine dayanmaktadır. Bu konuda belki de doğadaki en güzel örnek ağaçların ya da genel olarak bitki örtüsünün zemin tabakası içerisinde uzanan dallarının şev stabilitesini iyileştirmesidir. Yaygın kullanım alanları arasında yol kaplaması, istinat duvarı ve demiryolu dolguları, şev stabilitesi ve tamiri, deprem mühendisliği gibi işler bulunmaktadır (Hejezi vd., 2012). Çizelge 1.1’de sentetik olarak üretilen ve doğadan hazır olarak elde edilebilen fiber lifli malzemelere ait örnekler verilmiştir.

Çizelge 1.1 : Doğal fiberin elde edildiği bitkiler ve sentetik fiber çeşitleri (Hejezi vd., 2012)’den uyarlanmıştır.

Fiber Çeşitleri	
Doğal	Sentetik
Hindistan cevizi	Polypropylene
Sisal	Polyester
Palmiye ağacı	Polyethylene
Hint keneviri	Cam fiber
Keten	Naylon fiber
Arpa samanı	Çelik
Bambu	Polyvinyl Alkol
Şeker kamışı	

Tez kapsamında ilk bölümde sıkça kullanılan zemin iyileştirme yöntemleri hakkında genel bilgiler verilecektir. Sonrasında, zeminlerin kayma mukavemeti ve gerilme – şekil değiştirme davranışı ve bu davranışın kumlu zeminlerde ne şekilde olduğu üzerinde durulacaktır. Aynı bölümde, literatürdeki yapılan benzer çalışmalardan bazıları incelenecektir. Üçüncü kısımda kullanılan malzemelere ait özellik ve bilgiler verilecek ve yapılan deneysel çalışmalar açıklanacaktır. Ardından elde edilen sonuçlar verilecek ve genel değerlendirmeye varılacaktır.

İncelemeler için bir dizi laboratuvar deneyi iki farklı kum ve fiber tipi için yapılmıştır. Mukavemet parametrelerinin bulunması için rastgele fiber dağılıma sahip fiber katkılı kum numuneler üzerinde kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Numune karışım

oranları, kuru kumun ağırlığına oranla %0,25 – 1,0 arasında seçilmiştir. Kesme kutusu deneylerinde, kumun rölatif sıklığı da bir değişken olarak seçilmiş ve gevşek ve sıkı durumları temsil etmek üzere %20 ve 60 sıklıkta numuneler hazırlanmıştır.

İlk deney programında ince silika kum ve cam fiber kullanımı, sonrasında ise daha büyük dane dağılımına ve daha ince eşdeğer fiber çapına sahip Akpınar kumu ve polyroplene fiber tipindeki “Masterfiber” ürünü kullanılmıştır. Deneyler neticesinde, PP fiber tipinin daha etkili olduğuna karar verilmiş ve sonraki aşamada, fiber lifleri ile kum daneleri arasında aderansın sağlanması için, bağlayıcı malzeme olarak CEM II tipi çimento kullanılmıştır. Kuru kum ağırlığına %0,5 ve 1,0 fiber oranlarına sahip karışımlar hazırlanmış, yine kuru kum ağırlığına %5 – 15 oranlarında çimento ilave edilmiştir. Hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri uygulanmıştır.

Elde edilen sonuçlarda, yalnız fiber katkının, kumun pik içsel sürtünme açısında artış sağladığı ve kritik sürtünme açısındaki düşüşü limitlendirdiği görülmüştür.

Çimento katkının kullanıldığı deneylerde, fiber katılmasıyla birlikte, fiber miktarıyla birlikte numunelerin gevrekliğinin azaldığı ve davranışın sünekleştiği gözlemlenmiştir. aktarabilmeleri ve kendini taşıyan zemin kütlelerinin stabilitelelerini koruyabilmeleri için, zemin tabakalarının fiziksel ve mekanik özelliklerinin yeterli olması gerekmektedir.

2. ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ

Zemin üzerine inşaatı yapılacak yapıların, taşıdıkları yükleri güvenle zemine aktarabilmeleri ve kendini taşıyan zemin kütlelerinin stabilitelerini koruyabilmeleri için, zemin tabakalarının fiziksel ve mekanik özelliklerinin yeterli olması gerekmektedir. Aksi takdirde; kayma mukavemetine bağlı taşıma gücü problemleri, izin verilebilir değerlerin üzerinde elastik ve konsolidasyon oturmaları, şev kayması, göçme ve şişme gibi pek çok problemle karşılaşılabilir. Bu durumda, tasarım temel sistemi değiştirilerek derin temel sistemine gidilmesi, mevcut zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilerek gerekli güvenliğin sağlanması ya da başka bir mühendislik malzemesi ile değiştirilmesi uygulamasına gidilebilir. Bir çok durumda, var olan zeminin iyileştirilmesi, kazık imalatı gibi pahalı ve zaman alıcı derin temel çözümlerinden daha optimum olabilmektedir. Stabilizasyon yöntemleri; uygulama derinliğine göre sığ ve derin, zemin tipine göre kohezyonlu ve kohezyonsuz, ilave malzeme kullanımına göre de katkılı veya katkısız olarak gruplara ayrılmaktadır (Uzuner, 2013). Bu bölümde sık kullanılan zemin iyileştirme yöntemlerine değinilecektir.

2.1 Arazi Kompaksiyonu

Sığ zemin stabilizasyonunda kullanılır. Tabakalar halinde serilen zemin katmanları, optimum su muhtevasında sıralı olarak sıkıştırılır. Sıkıştırma sırasında; düz silindir, lastik tekerli silindir, vibratörlü silindir, keçi ayaklı silindir gibi iş makineleri kullanılır. Bu araçlar 300 kPa'dan 7500 kPa'a kadar kontak basıncı uygulayabilmektedirler. (Das, 2011). Sıkıştırma kalitesi, laboratuvar deney sonuçlarına göre rölatif kompaksiyon değerinin karşılaştırılmasıyla kontrol edilir. Yapılan incelemeler, maksimum kuru birim ağırlık değerlerine 0.5 m derinliğinde ulaşıldığını göstermiştir. Daha derinlerde, sıkışma azalmakta ve kuru birim hacim ağırlığı düşmektedir (Das, 2011). Uygulanan kompaksiyon miktarı, zeminin tasarım mühendislik özelliklerini sağlayacak şekilde belirlenmelidir. Kompaksiyon araçlarının seçimi, araçların hareket hızı, vibrasyon frekansı, serilen zemin katmanlarının kalınlığı, kompaksiyon araçlarının geçiş sayısı projeye göre belirlenir (Bell, 1993).

Şekil 2.1’de arazi kompaksiyonu sırasında kullanılan çeşitli araç ve ekipmanlar gösterilmektedir.



Şekil 2.1 : Arazi kompaksiyonunda kullanılan araç ve ekipmanlar (<http://www.dimolanka.com/images/compaction.jpg>).

2.2 Ön-Yükleme

Konsolidasyon teorisine dayanan bir uygulamadır. Sıkışabilir killerde, yüksek oturma değerlerini engellemek için kullanılır. Yapı yükünün öncesinde, zemine bu değerden daha yüksek bir sürşarj yüklemesi yapılarak, tasarım yükünün neden olacağı oturmanın inşaat öncesi hızlı bir şekilde tamamlanması sağlanır. Bu durumda, yapı inşaatı tamamlandığında oturma değerlerinin izin verilebilir mertebelerde kalması sağlanır. Sürşarj yükünün büyüklüğü ve ilk oturmanın gerçekleşmesi için gerekli süre, konsolidasyon deneyinden elde edilen parametrelerden yola çıkılarak hesaplanır.

Bu yöntemin kullanımı özellikle sıkışabilir siltler, doymun yumuşak killer, organik killer ve turba içeren zeminlerde uygundur (Bell, 1993).

Şekil 2.2’de bir konut yapısının zemin koşullarının iyileştirilmesi için ön yüklemesi yapılan bir proje görülmektedir.



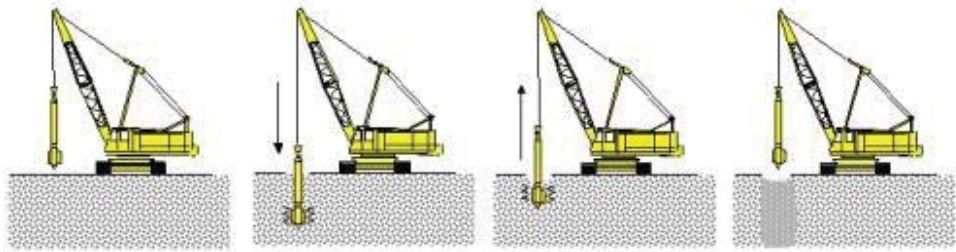
Şekil 2.2 : Yüksek katlı yapı inşaatı öncesi sahada önyükleme çalışması (<http://www.intracorp.ca/riverparkplace/river-park-place-construction-series/>).

2.3 Vibroflotasyon

Gevşek granüler zeminlerin sıkıştırılmasında uygun birim hacim ağırlığına getirilmesinde kullanılır. Eksantrik yüklemeyele santrifüj kuvveti yaratabilen vibrasyon ünitesi “vibroflot”, zemine 0.3 m’lik kademelerle indirilir. Ünitenin alt ve üst kısımlarındaki su jetleri, ünitenin zeminde kolayca hareket etmesini ve yukarıdan beslenen granüler malzemenin aşağıya indirilmesini sağlar. Zeminin granüler malzeme ile beslenmesinin sebebi, sıklılığın artmasına ve ünitenin yukarı çıkarılmasına bağlı hacim değişimini önlemektir. Başka bir sebep de vibrasyon dalgalarının çevre zemine iletilmesidir (Das, 2010).

İyileştirme yönteminin verimliliği, büyük oranda, zeminin dane çapı dağılımına ve kullanılan dolgu malzemesinin özelliklerine bağlıdır. Vibrasyon, zemin daneleri arasındaki sürtünmeyi azaltır ve iç gerilme yaratmadan danelerin en sıkı durumda yeniden yerleşmesine olanak sağlar. İşlem sonunda başlangıç boşluk oranı ve sıkışabilirlik kayda değer derecede azalır. Zeminin içsel sürtünme açısı ve buna bağlı olarak taşıma gücü ve sıvılaşma direnci artar (Bell, 1993).

Şekil 2.3’de basit bir vibroflotasyon çalışmasının adımları gösterilmektedir.



Şekil 2.3 : Vibrofloat tekniğinin adımları (http://www.menard-web.com/internetmenard.nsf/html/vibroflotation_en.html).

2.4 Patlatma

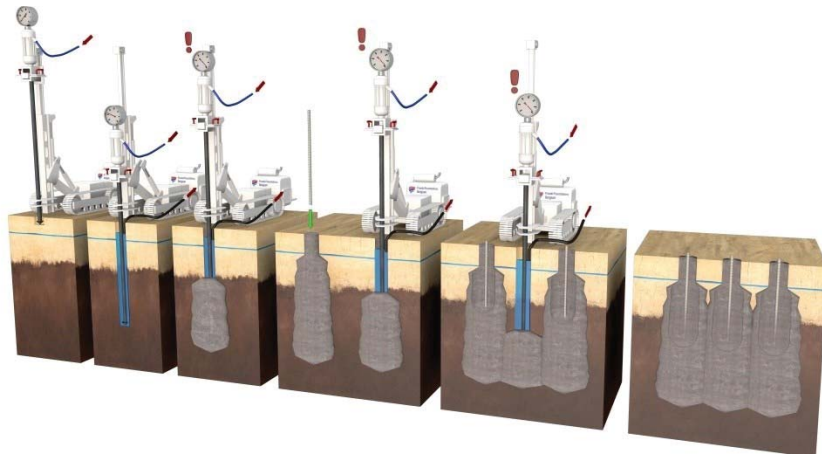
Dinamik bir kompaksiyon metodudur. İstenilen derinliğe kadar açılan sondaj kuyularına yerleştirmiş patlayıcılar kontrollü olarak patlatılır. Patlama sonucu, ilk olarak boyuna dalgalar oluşur. Basınç dalgalarını, Rayleigh dalgası formunda, kayma dalgaları takip eder. Bu dalgalar zeminde değişken kayma gerilmeleri meydana getirir ve zeminin sıklılığını artırır. Yöntemin efektif olması, patlamanın yarattığı boşluk

basıncının çabuk dağılmasına bağlıdır. Başlangıçta artan boşluk suyu basıncı, zemin iskeletinin yeniden düzenlenmesini sağlar (Impe, 1989).

2.5 Jet Grout

Jet grout, zemin içerisine yüksek basıncılı imento harcı enjekte edilerek, saha profilinde zemin-beton karışımı bir matris oluşturulması esasına dayanır. Enjeksiyon malzemesi olarak imento dışında, zaman içerisinde jel kıvamına gelen kimyasallarda oluşturabilmektedir. Metot zeminin katmanlarının dayanımını ve direncini arttırırken, geçirgenliğin düşürülmesi için de kullanılabilmektedir. İşlem, arzu edilen derinliğe kadar açılmış kuyu içerisinde yapılmaktadır. Kullanılan ekipmana bağlı olarak, enjeksiyon sırasında imento dışında, zemine have ve/veya su da püskürtülebilir. Bu malzeminin daha iyi karışması, zemin içerisine nüfuz etmesini kolaylaştırması bakımından tercih edilmektedir. Seçilen yöntem mevcut zemin koşullarına bağlı olup, zeminin aşınabilirliğine göre etkilenmektedir. Malzemelerin zemin içerisine zerk edilmesinde yüksek hızlar kullanılır. İşlem, enjeksiyon borusunun ucundan yapılabildiği gibi, borunun kenarlarından da uygulanabilmektedir.

şekil 2.4’de Jet Grout uygulamasının aşamaları gösterilmektedir.

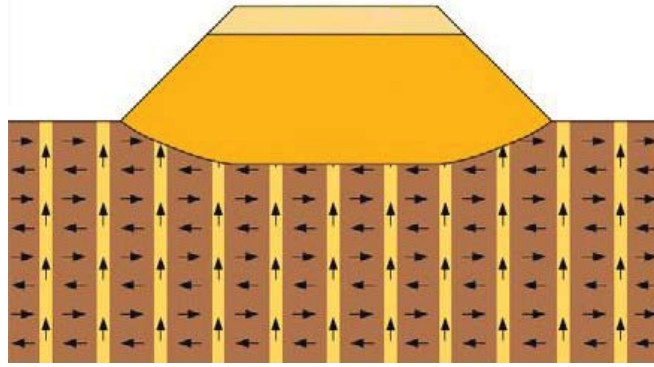


şekil 2.4 : Jet Grout uygulamasına ait betimleme
(http://www.ffgb.be/Franki/media/Franki_Media/).

2.6 Kum Drenler

Asıl yapının inşaatına başlanmadan önce olası yapısal oturmaları azaltmak ve zeminin taşıma gücünü arttırmak için doygun kohezyonlu zeminlerde kullanılmaktadır. Konsolidasyon süresi uzun olan zeminlerde, zemin içeresine aralıklarla kaplama

boruları itilir. Bu borular yukarı çekilmeden önce içlerine geçirgenliği yüksek kaba daneli çakıl, kum filtre malzemesi olarak doldurulur. Oluşturulan sütunlar dren görevi görürken, zemin suyu yukarıya doğru ya da drenlere dik doğrultuda harekete başlar. Suyun ince malzemeden ayrılmasıyla konsolidasyon oturması meydana gelir. Metoddan, Şekil 2.5’de görüldüğü gibi, önyükleme görevi gören bir dolgu tabakası da düşey efektif gerilmeyi arttırmak için kullanılmaktadır (Uzuner, 2013).



Şekil 2.5 : Önyükleme ve kum drenlerin birlikte kullanımı
(<http://www.sunlyengineering.com/>).

2.7 Dinamik Kompaksiyon

Dinamik kompaksiyon kaba daneli zemin katmanlarının sıkıştırılıp, mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Sıkıştırma işlemi, 7,5 ila 30,5 m yükseklikten arazi planında, belirli aralıklarla düşürülen bir ağırlık ile sağlanmaktadır. Ağırlık (tokmak) düşürülmesiyle, zemin içerisinde ilerleyen gerinim dalgaları zeminin sıkılaşmasına yardımcı olmaktadır (Şekil 2.6). İşlemi etkileyen ana faktörler zemin sınıfı, tokmak ağırlığı, düşürme yüksekliği ve tokmanın düşürüldüğü bölgeler arası açıklık mesafeleri olarak sıralanabilmektedir (Das, 2011).



Şekil 2.6 : Bir kıyı dolgusunun dinamik kompaksiyon ile sıkıştırılması
(<http://www.menard-web.com/Appli/intranet/referencesms.nsf/>).

2.8 Zemin Dondurma

Zeminde, daneler arasında bulunan suyun dış etkilerle sıcaklığının düşürülmesi ve zemin suyunun dondurularak buza dönüştürülmesi esasına dayanmaktadır. Buzlanmayla beraber, zeminin hidrolik geçirgenliği azalır ve dayanımı artar. Ayrıca yeraltı su seviyesinin hareketini engelleyerek, kazılarda kuru bir çalışma ortamı yaratılmasında da kullanılmaktadır. Bu yöntem geçici bir iyileştirme yöntemidir ve bir istinat duvarı gibi kalıcı yapının tamamlanmasına kadar sürdürülür. İşlem aktif ve pasif olmak üzere iki aşamadan oluşur. Aktif adımda, zemin suyu dondurularak bir buz duvar oluşturulur. İkinci aşamada ise, oluşturulan duvarın bütünlülüğü çözünme etkisine karşı korunur. Şaft kuyusu açımında (Şekil 2.7) ve tünel mühendisliğinde sıklıkla kullanılmaktadır (Bell, 1993).



Şekil 2.7 : Şaft kuyusu açımında zemin dondurma
(<http://www.moretrench.com/services/ground-freezing/>).

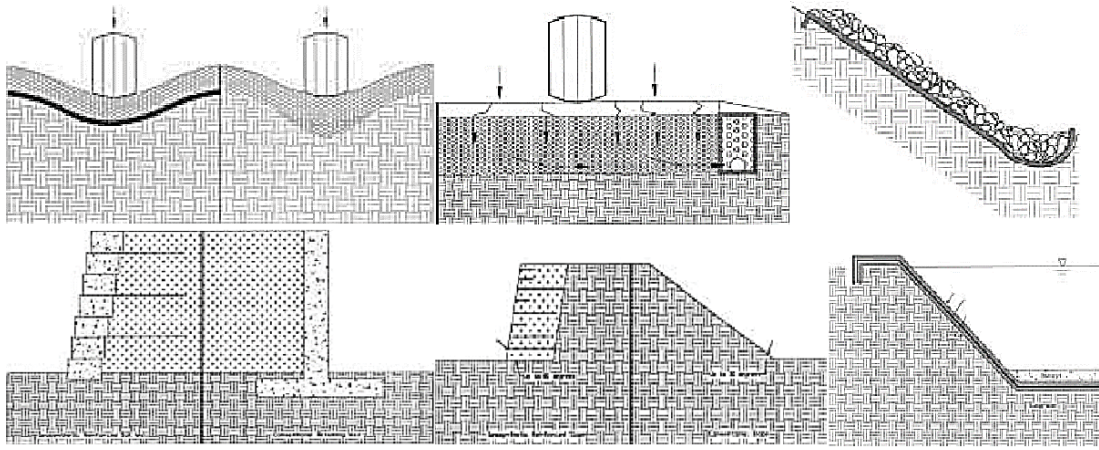
2.9 Geosentetik Kullanımı

Gün geçtikçe kullanımı artan geosentetik ürünler, içerisinde esnek polimer malzeme barındıran, zemin içerisinde kullanıldığında, zeminlerin mühendislik özelliklerini arttırarak yapı maliyetini düşüren yapı malzemeleridir. Zemin tabakası içerisinde dağınık halde bulunabildikleri gibi, devamlı bir doku üzerine delikler açılarak ya da kalın ipliklerin birbirlerine eklenmesiyle ağ yapıda da olabilirler (geogrid, geonet vb.).

Ayrıca, kesintisiz katmanların ardı ardına tabakalanmasıyla geçirimsiz bir yapılanma elde edilip, geçirimsizlik sağlanmaktadır (geomembran).

Fiziksel ve mekanik özellikleri yapıldıkları ana malzeme, diziliş şekli, içerisinde bulunduğu dane çapı gibi özelliklere bağlı olmakla beraber, genellikle içlerinde bulundukları zemine nazaran, yüksek gerilmelere dayanabilmekte ve kopma noktasına erişinceye kadar daha büyük şekil değiştirmelere maruz kalabilmektedirler (Bell, 1993).

Şekil 2.8’de geoteknik problemlerinde geosentetiklerin kullanım alanlarının örnekleri görülmektedir.



Şekil 2.8 : Geosentetiklerin geoteknik mühendisliğindeki çeşitli kullanım alanları (Handbook of Geosynthetics, 2002)’den uyarlanmıştır.

2.10 Çimento İle Stabilite

Zeminlerin dayanım, dayanıklılık, geçirimsizlik, kayma şekil değiştirme davranışı ve hacimsel stabilite özelliklerinin geliştirilmesi için, çimento katkı kullanımı seçilebilmektedir. Genellikle uygulamada Portland çimentosu tercih edilirken, katılan çimento oranı ulaşılacak istenen iyileştirme miktarına ve zemin tipine göre değişmektedir. Bu oran, yaygın olarak, zemin kuru ağırlığına göre %3 ve 16 arasında değişmektedir. İnce malzemenin mevcudiyeti gerekli çimento oranını arttırmaktadır. İyileştirmenin etkisinin tam olarak ortaya çıkabilmesi için, uygulamadan sonra küre ihtiyacı duyulmaktadır.

Optimum koşulların sağlanması için, çimentonun uniform dağılımı uygun karıştırma ile sağlanmalı ve kompaksiyon uygulanmalıdır. Karışım gevrek kırılma

özellikleri gösterirken, kullanılan çimento miktarı ve zemin tipine göre elastisite modülü 140 – 20000 MPa arasında değişiklik göstermektedir.

Çizelge 2.1’de çimento ile stabilize edilmiş farklı zemin tipleri için serbest basınç dayanımı aralıkları gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 : Zemin tipine göre çimento katkılı zeminlerin tipik serbest basınç dayanım aralıkları (Bell, 1993)’den uyarlanmıştır.

Zemin Cinsi	Serbest Basınç Dayanımı	
	7 Gün (MPa)	28 Gün (MPa)
Kumlu- Çakıllı	2,07- 4,14	2,76-6,90
Siltli	1,72- 3,45	2,07-6,21
Killi	1,38- 2,76	1,72-4,14

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1 Zeminlerin Kayma Gerilmeleri Altındaki Davranışı

Geoteknik problemlerin çözümünde, mühendislik yapılarının tasarımında ve zemin kütlelerinin stabilite kontrolünde, mevcut zemin katmanlarını oluşturan profilin kayma gerilmeleri altında davranışının bilinmesi esastır. Zeminin kayma davranışı iki veya üç boyutlu modellerle incelenebilir. Fakat, kayma gerilmelerinin ve deformasyonların düzlemsel olarak analizi, yapılacak işlemlerin basitleştirilmesi açısından tercih edilebilir.

Bu durumda; bir zemin parçacığı, düşeyde ve yatayda normal gerilmelerinin, kenarlarda da kayma gerilmelerinin etkisi altındadır. Düşey eksen takımı z, yatay eksen takımı x ile gösterilirse, dx ve dy diferansiyel boyutlarındaki bir zemin parçacığında, yatay ve düşey eksen boyunca meydana gelen normal ve kayma gerilmeleri değişimi göz önüne alındığında x ekseninde,

$$\sigma_x \text{ ve } \sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx$$

x eksenine dik doğrultudaki z ekseninde,

$$\sigma_z \text{ ve } \sigma_z + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} dz$$

parçacığın z eksenine dik kenarlarında,

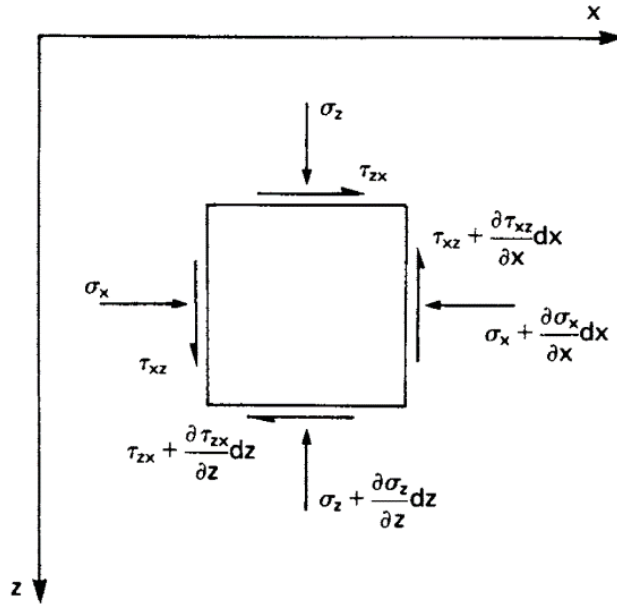
$$\tau_{zx} \text{ ve } \tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz$$

x eksenine dik kenarlarında

$$\tau_{xz} \text{ ve } \tau_{xz} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} dx$$

gerilmeleri yazılabilir. τ_{xz} ve τ_{zx} bulundukarı eksenlerdeki kayma gerilmelerini ifade etmektedir.

Şekil 3.1’de iki boyutlu bir düzlemde bulunan bir zemin parçacığının yüzeylerine etkiyen normal gerilmeler ve kayma gerilmeleri şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : İki boyutlu düzlemde normal ve kayma gerilmeleri (Craig, 2004).

Merkeze göre moment alınarak denge denklemleri yazıldığında ve sonrasında yüksek mertebedeki diferansiyel ifadeler ihmal edilirse, Denklem 3.1 – Denklem 3.3’de görülen eşitlikler yazılabilir.

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} - \gamma = 0 \quad (3.3)$$

Burada “ γ ” ifadesi parçacığın ağırlığından gelmektedir ve zeminin birim hacim ağırlığına bağlıdır.

Benzer şekilde, normal ve kayma gerilmelerinden dolayı meydana gelen deformasyonlar incelenecek olursa ve x ve z yönündeki yerdeğiştirmeler u ve w ile gösterilirse, x eksenindeki şekil değiştirme Denklem 3.4’de gösterildiği gibi, benzer şekilde z eksenindeki şekil değiştirme de Denklem 3.5’de görüldüğü gibi yazılabilir. Kayma deformasyonu is u ve w yerdeğiştirmelerine bağlı olarak yazılabilir (Denklem 3.6).

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial z}{\partial z} \quad (3.5)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad (3.6)$$

Denklem 3.6’da görülen γ_{xz} terimi x eksenine dik, z yönünde oluşan kayma gerilmesinin meydana getirdiği kayma deformasyonunu ifade etmektedir. Aynı terim, buna dik eksen de geçerlidir.

Sunulan ifadelerde, gerilme ve deformasyon terimleri birbirlerinden bağımsız olarak ifade edilmiştir. Fakat, bir malzemenin davranışının analiz edilebilmesi için, gerilme ve deformasyon özelliklerinin ilişkilendirilmesi ve aralarında bir bağ kurulması gerekmektedir. Bu ilişki, büyük oranda malzeme özelliklerine bağlıdır. Zeminlerin malzeme özelliklerine bakıldığında, homojen olmayan bir yapıya sahip oldukları görülmektedir. Ayrıca, bir profil içerisinde, farklı yönlere gidildiğinde, farklı özellikler göstermektedirler.

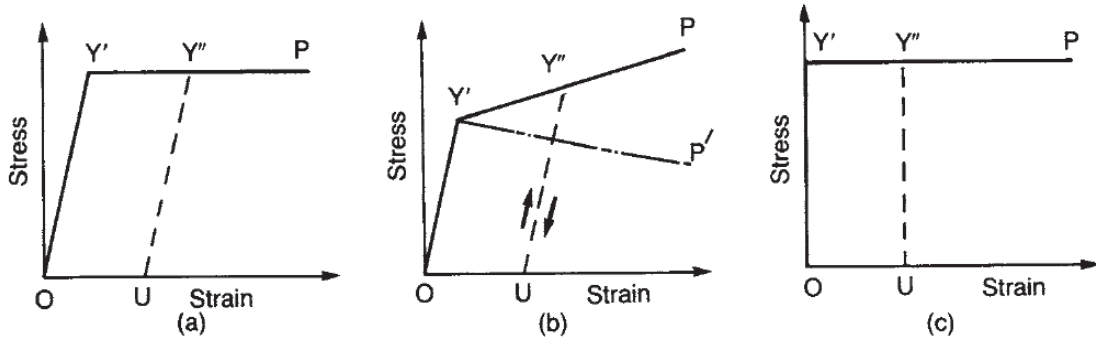
Kısaca, zeminleri genel olarak, homojen olmayan anizotropik malzemeler olarak tanımlayabiliriz. Bu durum, gerilme deformasyon davranışını modellemenin zorlaşmasına neden olmaktadır. Bu sebepten dolayı, modelleme esnasında bir takım varsayımlar ve kabuller yapılarak, analizler basitleştirilmektedir (Craig, 2004).

Bu kapsamda kullanılan bazı modeller;

- Elastik – Tam Plastik
- Rijit
- Elastik – Pekleşme
- Elastik – Yumuşama

olarak sıralanabilir.

Modellere bakıldığında, genel olarak, iki belirgin kısmın olduğu görülmektedir. Yükleme kaldırıldığında deplasmanların başlangıç noktasına döndüğü “Elastik” bölge ve yüklemenin kaldırılmasından sonra kalıcı deformasyon bırakan “Plastik” bölge. Bu bölgelerin tanımlanması için kullanılan basit modeller aşağı açıklanmıştır. Şekil 3.2’de elastik ve plastik davranış modelleri gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Basitleştirilmiş malzeme modelleri, (Craig, 2004)’ten uyarlanmıştır: (a) Elastik – Tam Plastik. (b) Elastik – Pekleşme ve Elastik – Yumuşama. (c) Rijit.

3.1.1 Elastik modeller

3.1.1.1 Lineer elastik

Kayma gerilmesi ile deformasyon arasında doğru orantı olduğu durumdur. Bu sebepten dolayı, davranış eğrisi bir doğru formundadır ve sabit bir eğime sahiptir. Kayma gerilmelerine ek olarak normal gerilmelerin olduğu durumda Hooke Yasası geçerlidir. Buna göre, farklı eksenlerdeki şekil değiştirmeler Denklem 3.7 ile Denklem 3.8’de normal gerilmeler, young modülü ve poisson oranı cinsinden ifade edilmiştir.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_z) \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu\sigma_x) \quad (3.8)$$

“E” terimi malzemenin elastisite modülünü tanımlamaktayken, “ν” zeminin Poisson oranını göstermektedir. Zeminlerde kayma davranışı hakimdir. Bu nedenle kayma modülünün tanımlanması daha yaygındır. Davranış lineer olduğundan, elastisite modülü, kayma modülü ve Poisson oranı arasında sabit bir ifade yazılabilir. Bu ifade Denklem 3.9’da görülmektedir.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.9)$$

Kayma modülü, tanımı itibarıyla Denklem 3.10’da gösterildiği şekilde yazılabilir.

$$\tau_{xz} = G\gamma_{xz} \quad (3.10)$$

Bu ifadelerin kullanılmasıyla, eksenel ve kayma deformasyonlarının bulunması için matris çözümleri uygulanabilir.

3.1.1.2 Non-Linear elastik

Lineer modelde, kayma modülünün sabit olduğu ve Poisson oranı ve Young modülü ile aralarında sabit bir ilişki olduğundan bahsedilmişti. Non-Linear modelde ise, kayma modülü gerilmeye bağlı olarak değişmektedir. Yalnızca küçük deformasyonlarda sabit olduğu düşünülür. Küçük deformasyonlardaki kayma modülü, G_0 , maksimum değerdedir ve bu değer kayma deformasyonuna bağlı olarak azalır.

3.1.2 Plastik modeller

3.1.2.1 Mohr-Coulomb modeli

Mohr-Colulomb modeli Coulomb'un kırılma kriterini ve Mohr'un gerilme durumunu gösteren dairelerini içerir. Coulomb kırılmayı zemin partiküllerinin hareket edip birbirlerinden görel olarak uzaklaşmaya başladığı an olarak tanımlamaktadır. Fakat bu, göçmenin olup olmayacağı hakkında bilgi vermez. Bir zemin matrisi içerisinde kırılma hareketinin başlanması için, önce, dış kuvvetlerin kritik bir kayma düzlemi oluşturması gerekir. Bu düzlem üzerinde oluşan kayma gerilmesinin, zemini bir arada tutan destekleyici kuvvetleri yendiği takdirde kırılma başlar. Kırılmaya direnen kuvvetler Coulomb'un sürtünme yasası ile oluşmaktadırlar. Sürtünme kuvvetinin ise, normal kuvvetlere direkt olarak bağlı olduğu açıktır. Eğer, zemin daneler yatay bir ekseninde hareket ediyorsa, oluşacak sürtünme kuvveti Denklem 3.11'de olduğu gibi;

$$\tau_f = (\sigma'_n)_f \cdot \tan(\phi') \quad (3.11)$$

olarak yazılabilir. Hareket yukarı ya da aşağı yönde olmak üzere düşey bir bileşen içeriyorsa, bu kuvvet dilatasyon açısı da düşünülerek Denklem 3.12'de görüldüğü gibi ifade edilebilir.

$$\tau_f = (\sigma'_n)_f \cdot \tan(\phi' + \psi) \quad (3.12)$$

Burada “ α ” dilatasyon açısını temsil etmektedir. Zemin genişliyorsa pozitif, büzülme gösteriyorsa negatif değerler alır. Dilatasyon açısı, düşey yer değiştirme ile yatay yerdeğiştirmenin oranı olarak hesaplanabilir (Denklem 3.13).

$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{-\Delta z}{\Delta x}\right) \quad (3.13)$$

Zemin kütlelerini danalar arası kuvvetlere göre iki kategoriye ayırmak mümkündür; çimentolaşmış ve çimentolaşmamış. Çimentolaşmamış tipteki zeminler, kaymaya direnen kuvvet yalnızca sürtünmeden dolayı oluşur. Diğer durumda ise, danelerin birbirlerine uyguladığı kohezif kuvvet de denkleme katılmaktadır. Denklem 3.12 düzenlenirse, kayma mukavemeti Denklem 3.14 görüldüğü üzere yazılabilir.

$$\tau_f = c_{cm} + (\sigma'_n)_f \cdot \tan(\phi' + \alpha) \quad (3.14)$$

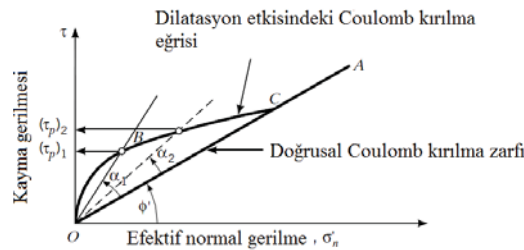
Eğer sürtünme açısı ve dilatasyon genel olarak tanımlanırsa ise Denklem 3.15'e ulaşılır.

$$\tau_f = c_{cm} + (\sigma'_n)_f \cdot \tan(\xi) \quad (3.15)$$

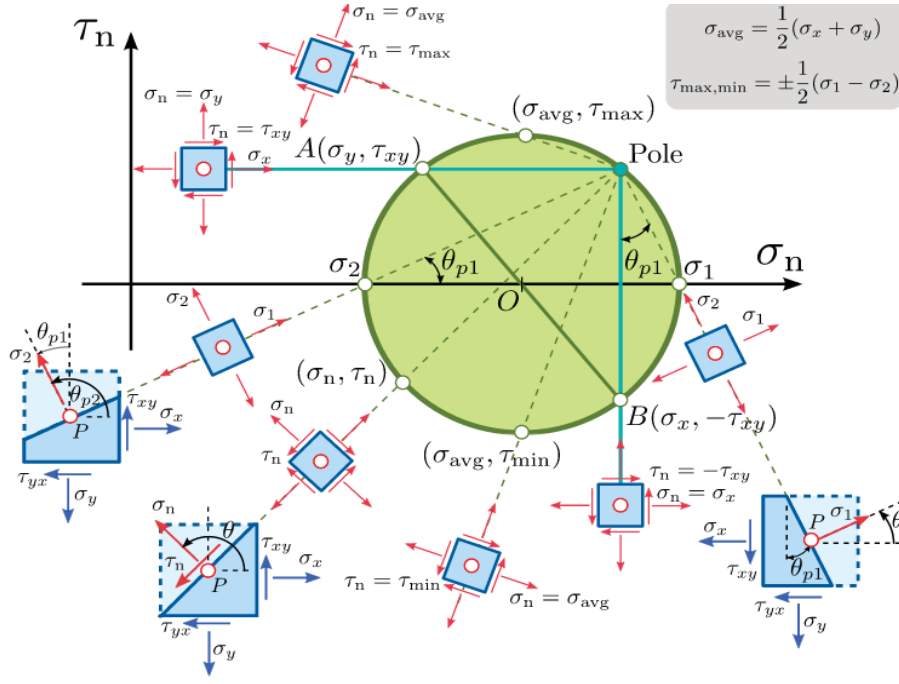
Dilatasyon açısının doğrusal Coulomb kırılma zarfı üzerindeki etkisi Şekil 3.3'de görülmektedir.

Öte yandan, söz konusu “çimentolaşma”dan dolayı oluşan kuvvet ve sürtünmeden meydana gelen kuvvet aynı zamanda mobilize olmayabilir. Ayrıca, çimentolaşma kuvveti veya görünür kohezyon, yüksek deformasyonlarda etkisini kaybetmeye başlar.

Mohr daireleri, sonsuz küçük bir zemin elemanının, düzlemsel normal ve kayma gerilmeleri altındaki iç gerilmelerinin bulunmasında faydalanan geometrik bir çözümdür. Dairenin çapını, asal normal gerilmelerin farkı oluşturur. Asal gerilmeler, çevresel kayma gerilmelerinin bulunmadığı doğrultulardaki normal gerilmelerdir. Mohr daireleri kullanılarak, zemin üzerindeki asal gerilmeler veya bir doğrultudaki normal gerilmeler ile birlikte çevresel kayma gerilmeleri biliniyorsa, Zemin içerisindeki herhangi bir açıya sahip düzlemdeki normal ve kayma gerilmeleri de bulunabilir. (Şekil 3.4).

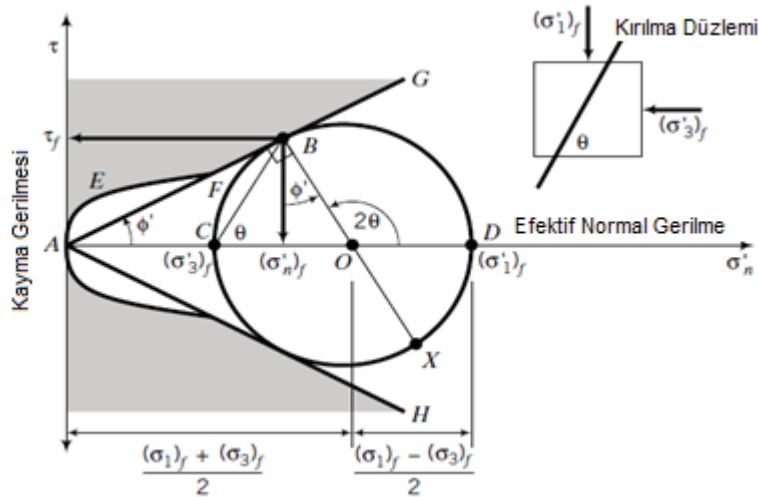


Şekil 3.3 : Doğrusal ve eğrisel Coulomb kırılma zarfı (Budhu, 2010).



Şekil 3.4 : Mohr dairesi ve farklı kesitlerdeki gerilme halleri
(https://en.wikipedia.org/wiki/Mohr%27s_circle).

Mohr-Coulomb kırılma kriteri Mohr dairelerinin ve bu dairelere limit zarfı teşkil eden Coulomb'un sürtünme teorisinin birleştirilmesiyle elde edilmektedir. Eğer, normal ve kayma gerilmelerine sahip bir kırılma zarfı, Mohr daireleri ile birlikte çizilirse, bu geometriler dairelere teğet olan bir (σ, τ) noktasında kesişirler (Şekil 3.5). Bu nokta kırılma halindeki gerilme değerlerini (σ_f, τ_f) gösterir.



Şekil 3.5 : Mohr-Coulomb kırılma zarfı (Budhu, 2010).

Mohr-Coulomb modeli, zeminlerin mukavemet parametreleriyle ilgili önemli bilgiler verir.

3.1.3 Kaba daneli zeminlerin kayma mukavemeti ve kayma altındaki davranışı

Zeminlerin kayma mukavemetine ve gösterdiği gerilme deformasyon ilişkisine, dane çapının etkisi büyüktür. Kum ve çakıllar olarak tanımlayabileceğimiz kaba daneli zeminlerin mukavemet parametreleri, ince daneli zeminlerin aksine, drenaj koşullarından fazla etkilenmemektedir. Daneler arasındaki boşlukların fazla olması ve geçirimsizliğin yüksek olmasından dolayı, zemin içerisinde aşırı boşluk suyu basıncı oluşmaz. Mukavemet parametrelerini etkileyen en önemli etmenlerden birinin efektif gerilme kavramı olduğu düşünülürse, kumlarda toplam ve efektif gerilmelerin eşit olması bu koşulun ortaya çıkmasının sebebi olarak yorumlanabilir.

Diğer yandan, mukavemet parametreleri, zeminin sıkılığından veya danelerin formasyonuna bağlıdır. Zemin sıkı olduğunda, daneler arasında bir kilitlenme durumu söz konusudur. Bir kayma durumunda, kesme kuvvetinin önce bu kilitlenme formasyonunu açması gerekmektedir.

Sıkı zeminler, pik kayma gerilmesini düşük deformasyonlarda gösterirler. Bu noktadan sonra, daneler arasındaki kilitlenme ortadan kalkar ve gerilme deformasyon ile birlikte azalır. Ayrıca, sıkı dane formasyonunun bozulmaya başlaması, zemin içerisinde kabarma olmasına neden olur.

Gevşek zeminlerde ise, kayma gerilmesi, deformasyona bağlı olarak artış gösterir. Belli bir deformasyondan sonra ise sabitlenir ve maksimum değere ulaşır. Bu değer, aynı tipte daha sıkı bir zemine göre daha düşüktür. Düşey deformasyona ise, kayma boyunca artış gösterir ve kayma gerilmesinde olduğu gibi, bir noktada nihai değerine ulaşır.

Önceki bölümde bahsedildiği gibi, gevşek ve sıkı zeminlerdeki düşey deformasyon karakteristikleri dilatasyon açısı, ψ kavramını oluşturmaktadır.

İçsel sürtünme açısı, bağımsız danelerin yüzey alanına bağlı oluşan sürtünmeden ve buna ek olarak, zemin formasyonu bozmak ya da yeniden düzenlemek için gerekli kuvvetlerin etkisiyle oluşur. Yalnızca sürtünmeden kaynaklanan içsel sürtünme açısı için gerçek sürtünme açısı, ϕ_μ da denilebilmektedir. Eğri belirgin bir tepe noktası gösteriyorsa bu değere pik sürtünme açısını, ϕ_{maks} ; kayma gerilmesinin değişme göstermediği deformasyonlarda ise kritik sürtünme açısı, ϕ_{cr} gözlemlenir.

Gevşek ve sıkı zeminlerin gerilme deformasyon davranışına ilişik hesaplanabilen içsel sürtünme açısı değerlerine bakıldığında;

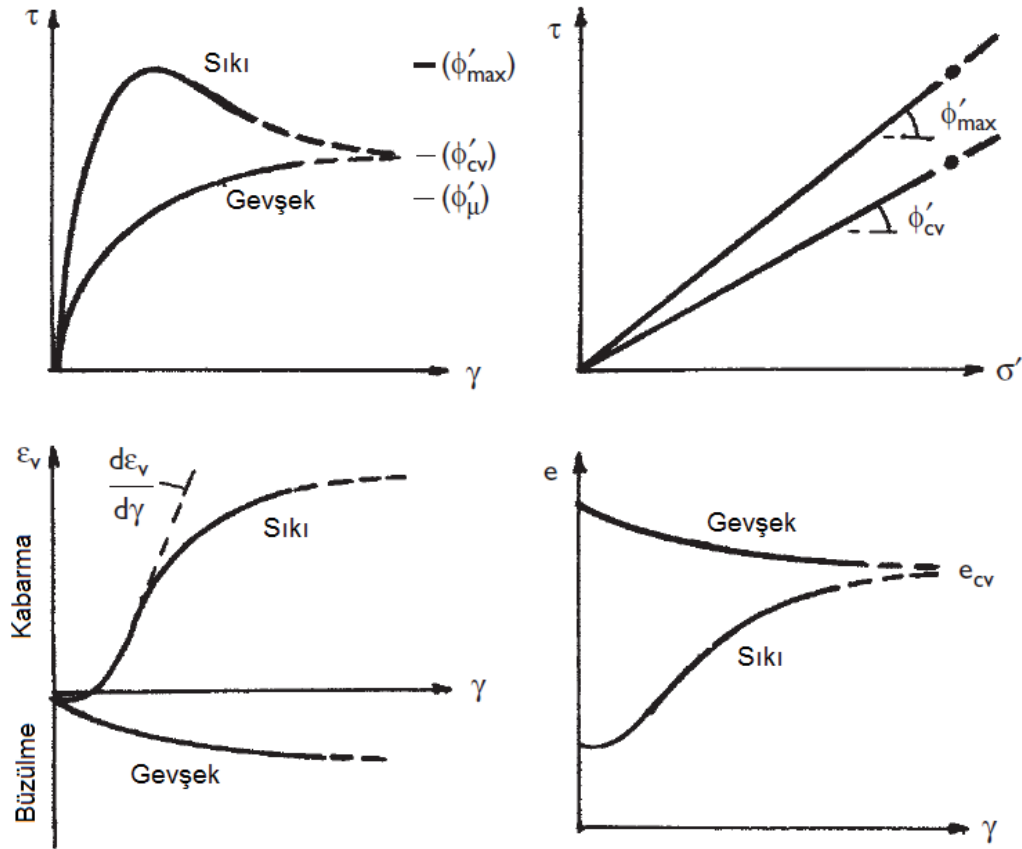
Sıkı zeminler; $\phi_{maks} \rightarrow \phi_{cr} : \phi_{maks} > \phi_{\mu}$

Gevşek zeminler; $\phi_{cr} : \phi_{cr} < \phi_{\mu}$

yorumu yapılabilir.

Başka bir değişle, sıkı zeminler önce bir pik sürtünme açısı değerine ulaşırlar. Bu değer, zeminin gerçek sürtünme açısından büyüktür. Aradaki fark, zemin formasyonunu aşmak için gerekli enerjiden gelir.

Gevşek zeminlerde ise, belirgin bir pik değer görülmez. Zemin artan şekil değiştirmeyeyle birlikte kademeli olarak, kritik sürtünme açısına ulaşır. Bu değer ile gerçek sürtünme açısı arasındaki fark, zemin danelerinin yeniden düzenlenmekte kullanılan enerjiyle ilgilidir. Zaman içerisinde yapılan çalışmalar, farklı sürtünme açısı değerleri ve dilatasyon açısı arasında, ifadelerin ve ampirik formüllerin bulunmasını sağlamıştır.



Şekil 3.6 : Kaba daneli zeminlerin kayma mukavemeti karakteristikleri (Craig, 2004).

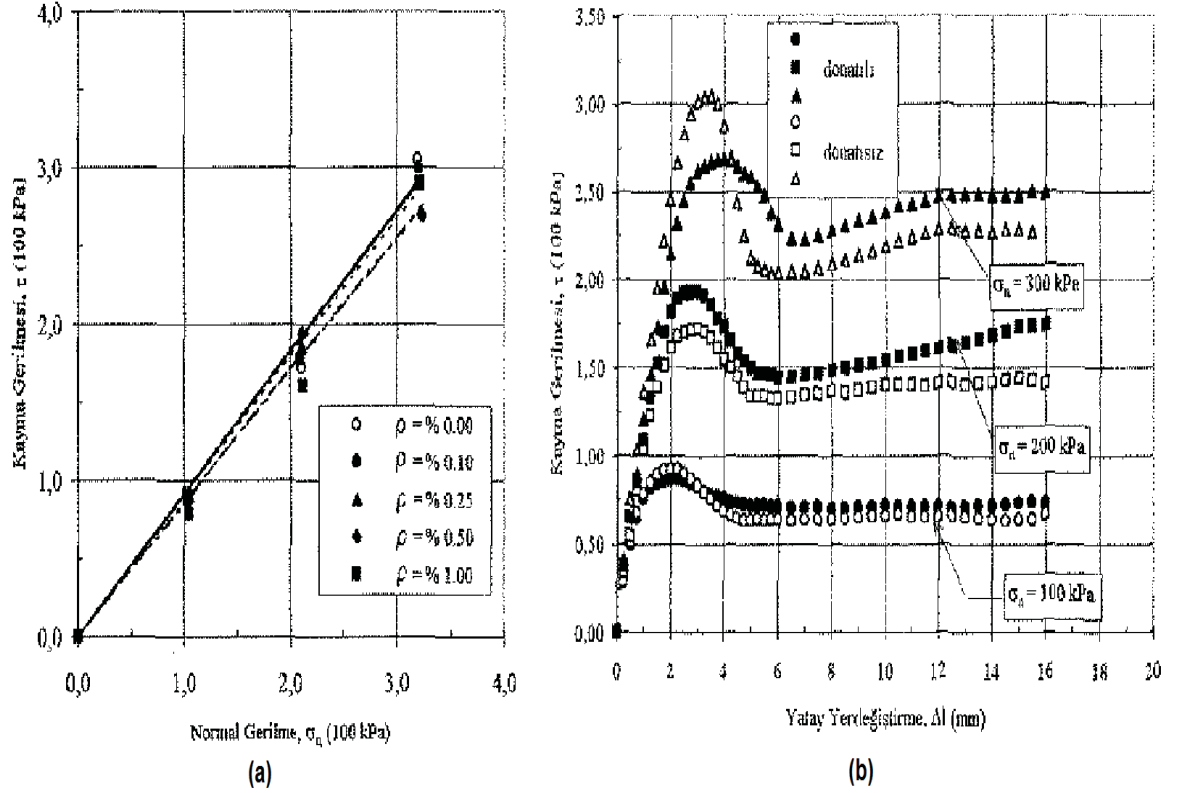
3.2 Konuyla İlgili Önceki Çalışmalar

Çetinkaya (2012), kil, uçucu kül ve fiber malzemeleri kullanarak yaptığı çalışmada, katkı maddesi kullanılarak zeminlerin iyileştirilmesi ve mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesiyle ilgilenmiştir. Zonguldak Çatalağzı termik santralinden elde ettiği F tipi uçucu kil ve Fiberforce firmasının F19 polipropilen lifli fiber ürününü yüksek plastisiteli kil zemine ekleyerek farklı oranlara sahip karışımlar elde etmiştir. Karışımlarda; ağırlıkça %50 kil ve %50 uçucu küle ek olarak %0,5, %1,0, %2,0 fiber malzemesi bulunmaktadır. Karışımlar üzerinde Standard Proctor, CBR, Serbest Basınç Dayanımı ve uygun boyutlu numuneler hazırlamak amacıyla Harvard Kompaksiyon deneyi yapmıştır.

Deney sonuçlarında; uçucu kül ve fiber katkının, kil zeminin mühendislik özelliklerini önemli boyutlarda geliştirdiğini bulmuştur. Bu değişim en belirgin olarak, %50 kil, %50 uçucu kül ve karışım ağırlığına %1,0 oranında fiber eklenen numunelerde görülmüştür. CBR oranı yalın kil numunesine göre %500; kil uçucu kil karışıma göre %100 artış göstermiş. Aynı kıyaslamaya göre serbest basınç dayanımı da sırasıyla %48 ve %108 oranlarında gelişim göstermiştir. Çalışılan numunelerin ortalama CBR ve Serbest Basınç Dayanımı değerlerine bakıldığında; yalın kilin CBR değeri, uçucu kül eklendiğinde %2 den %6'ya, %1 fiber katkıyla beraber %12 değerine yükselmiştir. Aynı şekilde, Serbest Basınç Dayanımı uçucu kül ile birlikte 156 kPa'dan 230 kPa'la, %1 fiber katkıyla 325 kPa değerine ulaşmıştır.

Yetimoğlu ve Salbaş (2002), kötü derecelenmiş uniform kum numuneleri üzerinde, sıralı kesme kutusu deneyleri yaparak dağınık lifli fiber ile donatılmış kumun, kayma mukavemeti ve kayma davranışındaki değişimleri incelemiştir. Deneylerde 2 cm uzunluğunda polypropilen fiber kullanılmıştır.

Numunelerin rölatif sıklığı %70 olarak sabitlenmiş, fiber katkı oranları, ağırlıkça %0,10, 0,25, 0,50 ve 1.00 olarak seçilmiştir. Sıralı kesme kutusu deneyleri sonucunda, kumun, pik içsel sürtünme açısında çeşitli numunelerde azalma olmakla birlikte, etkin bir değişim görülmemiştir. Fiber donatı kum zeminin kohezif özelliklerini değiştirmemiştir. Diğer yandan, numunelerin residuel kayma mukavemetinin arttığı ve göçme sonrası mukavemet kaybının sınırlandığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.7).

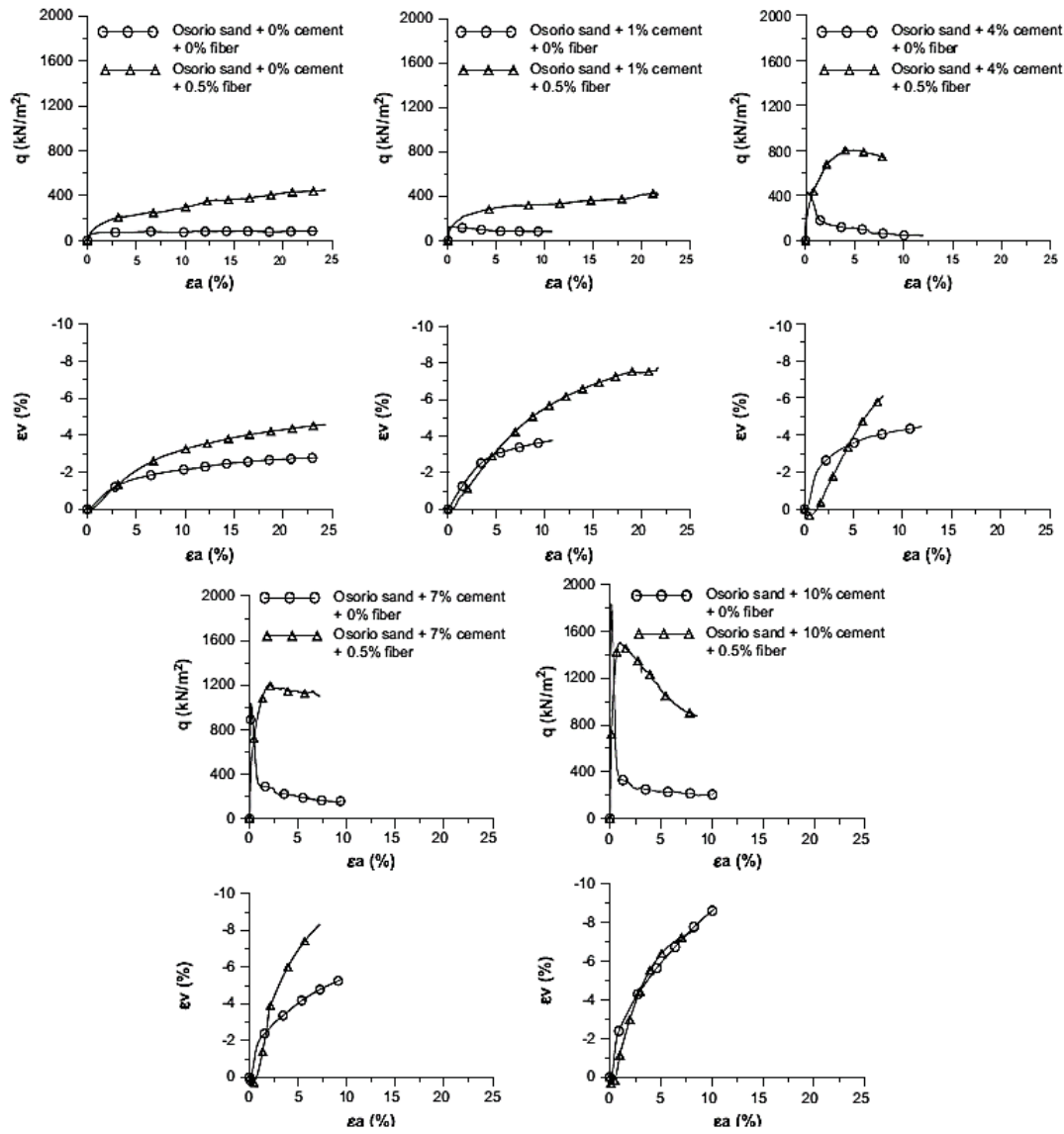


Şekil 3.7 : a) Çeşitli oranlarda fiber katkılı kum numunelerin kırılma zarfları, b) %0.5 oranında fiber içeren numunelerin kayma gerilmesi – yer değiştirme davranışındaki değişim (Yetimoğlu ve Salbas, 2002).

Consoli ve diğ. (2009) tarafından yapılan çalışmalarda, Osorio kumuna, kuru ağırlıkça %0 – 10 arasında çimento ve % 0 – 0,5 oranlarında PP fiber eklenerek, katkılı zemin numunelerinin pik kayma mukavemeti, gerilme dilatasyon ilişkisi, başlangıç elastisite modülü ve genel malzeme davranışı incelenmiştir. Üç eksenli basınç deney düzeneği kullanarak bir dizi drenajlı deney yapılmıştır.

Deneyler sonucunda, yalnız çimento katkının pik kayma mukavemetini önemli ölçüde arttırdığı fakat malzeme davranışını gevrek hale getirdiği görülmüştür. Yalnızca fiber katılarak yapılan deneyler yine pik gerilmeyi arttırmış ve plastik davranışı “strain hardening” haline getirmiştir.

Çimento ve fiber katkının beraber olduğu durumlarda zeminin mukavemet özellikleri artmış ve yalnız çimento katkıya göre davranış sünekleşmiştir. Bu süneklik, % 4 çimento oranından sonra etkisini azaltmaktadır. Ayrıca, gerilme dilatasyon ilişkisinin katkılarla birlikte önemli ölçüde değiştiği not edilmiştir. Başlangıç elastisite modülü, fiber katılmasıyla değişmemiş, çimentoyla birlikte artmıştır. Çimento ve fiber katılı numuneler üzerinde gerçekleştirdikleri deney sonuçları Şekil 3.8’de görülmektedir.

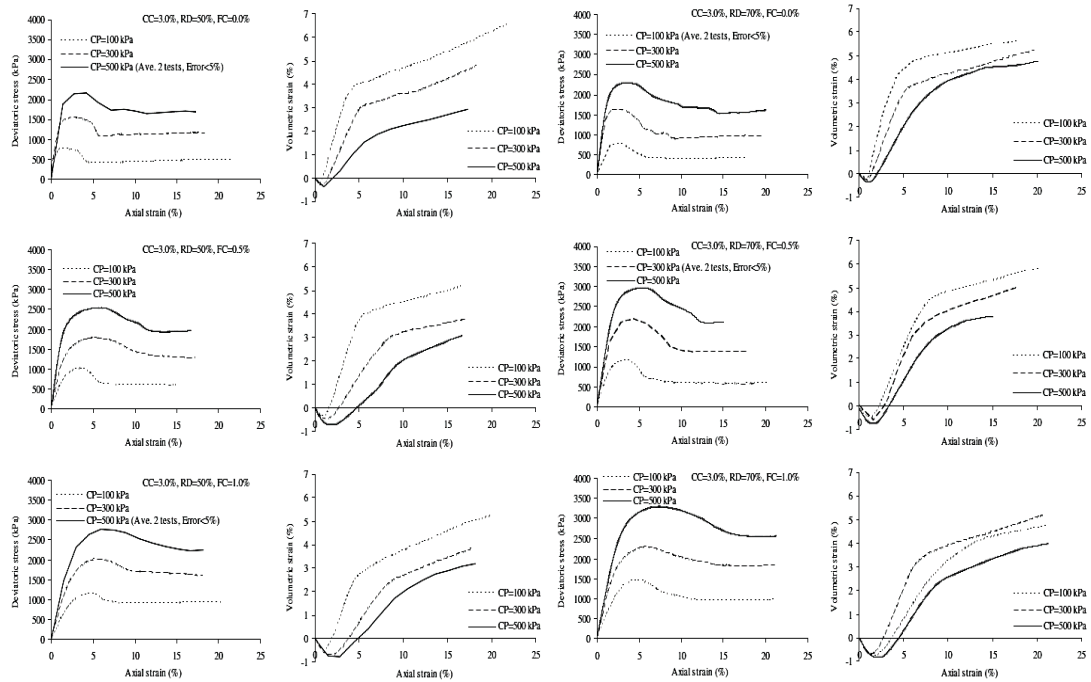


Şekil 3.8 : %0.5 fiber oranında ve farklı çimento dozajlarındaki kum numunelerin artık gerilme – eksenel deformasyon – hacimsel deformasyon grafikleri (Consoli vd., 2009).

Çizelge 3.1 : Fiber donatılı ve donatısız numunelerin farklı çimento oranlarına göre mukavemet parametreleri (Consoli vd., 2009).

Cement content (%)	Non-reinforced sand		Fiber-reinforced sand	
	c' (kPa)	ϕ' (degrees)	c' (kPa)	ϕ' (degrees)
zero	zero	36.7	14.5	48.5
1	19.5	30	56	45
4	84	39	132	44
7	146.5	52	193.5	46.5
10	328	48.5	225	51.5

Hamidi ve Hooresfand (2013), önceki uygulamaların ışığında yaptıkları çalışmada, fiber katkının, çimento ile stabilize edilmiş kum üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. %50 ve 70 sıklığında, ağırlıkça %3 çimento katılmış numunelere %0,5 ve %1,0 oranlarında fiber eklemişler ve değişken fiber oranlarının, rölatif sıklığın ve farklı çevre basınçlarının, malzemin gerilme – şekil değiştirme ve hacimsel değişimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir (Şekil 3.9). %0,5 oranına kadarki fiber oranının %15 – 25 arası mukavemet artışını sağladığı görülmüştür. Numunelerin sekant modülü arttırmıştır. Gevreklik %0,5 oranına kadar değişmezken, %1 oranında azalmıştır.



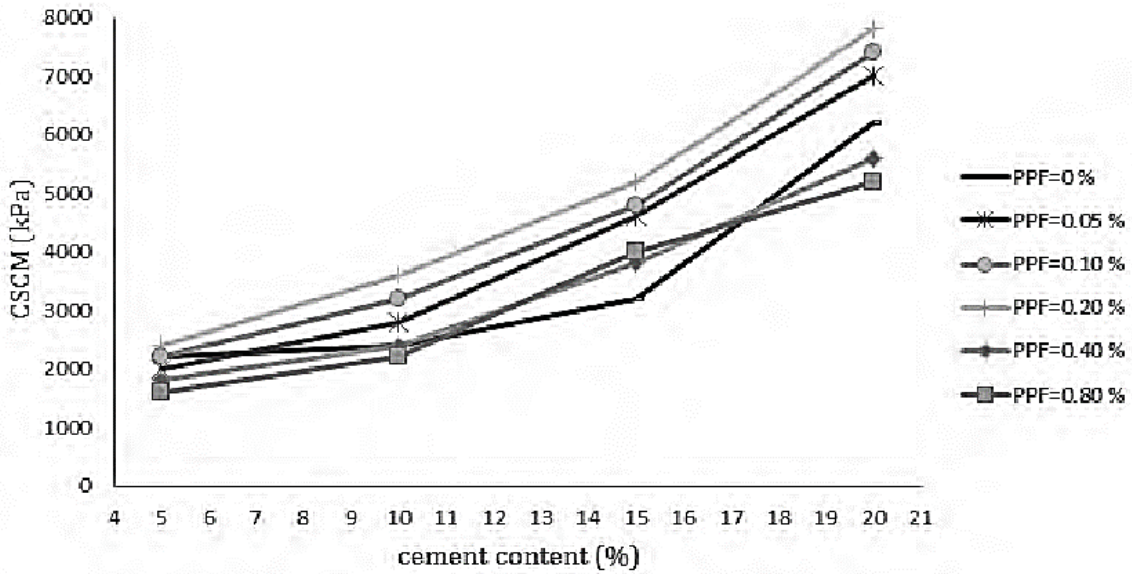
Şekil 3.9 : %0 – 1,0 fiber oranı, %3 çimento oranındaki %50 ve 70 sıklılıktaki numunelerin gerilme – deformasyon ve hacimsel değişim grafikleri (Hamidi ve Hooresfand, 2013).

Gerkuş (2011), %10 su muhtevasında ve %55 sıklılıkta hazırladığı kum numunelere, %0.1, %0.5 ve % 2 oranında fiber katarak, zeminin statik ve dinamik özelliklerindeki değişimleri incelemiştir. Uyguladığı statik üç eksenli basınç deneylerinde fiberli kumun, içsel sürtünme açısının arttığını ve kohezyon kazandığını gözlemlemiştir. Öte yandan, kesme kutusu deneylerinde kumun kohezyon kazanmasına karşın içsel sürtünme açısında azalma olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, fiber katkılı kumun gerilme – şekil değiştirme davranışının gevşekten sıkıya değiştiğini belirlemiştir. Benzer şekilde, Torabi (2011), fiber katkılı kumlar üzerinde gerçekleştirdiği deneylerde, kum ağırlıklınca %0.1 oranında fiber katkılı zeminlerin mühendislik

özelliklerinde değişme olmaz iken, bu oran %1.0'e yükseltildiğinde sıvılaşma direncinin ve kayma mukavemetinin arttığını sonucuna ulaşmıştır.

Parto ve Kalantari (2012) benzer bir çalışmada, rüzgarla taşınan kum tipi zeminlerin çimento ve PPF ile iyileştirilmesini araştırmış ve sırasıyla %5, 10, 15, 20 çimentoyla birlikte %0,05, 0,10, 0,20, 0,40 ve 0,80 oranlarında fiber oranına sahip numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri uygulamışlardır. Deney sonuçlarında en uygun fiber oranının %0,02 olduğuna kanaat getirmişlerdir. Ek olarak, çimento dozajının artmasıyla, dayanım da artmıştır. Fiber katılmadan yapılan deney sonuçları irdelendiğinde, numunelerin gevrek davranış sergilediği ve kırılmanın oluşan çekme çatlaklarında kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Fiber kullanıldığında ise, liflerin bu çatlaklar arasında bir köprü kurduğu ve çatlakların ilerlemesini önlediği öne sürülmüştür.

Şekil 3.10'da farklı çimento ve fiber oranlarının, numunelerin basınç dayanımına etkisi görülmektedir.



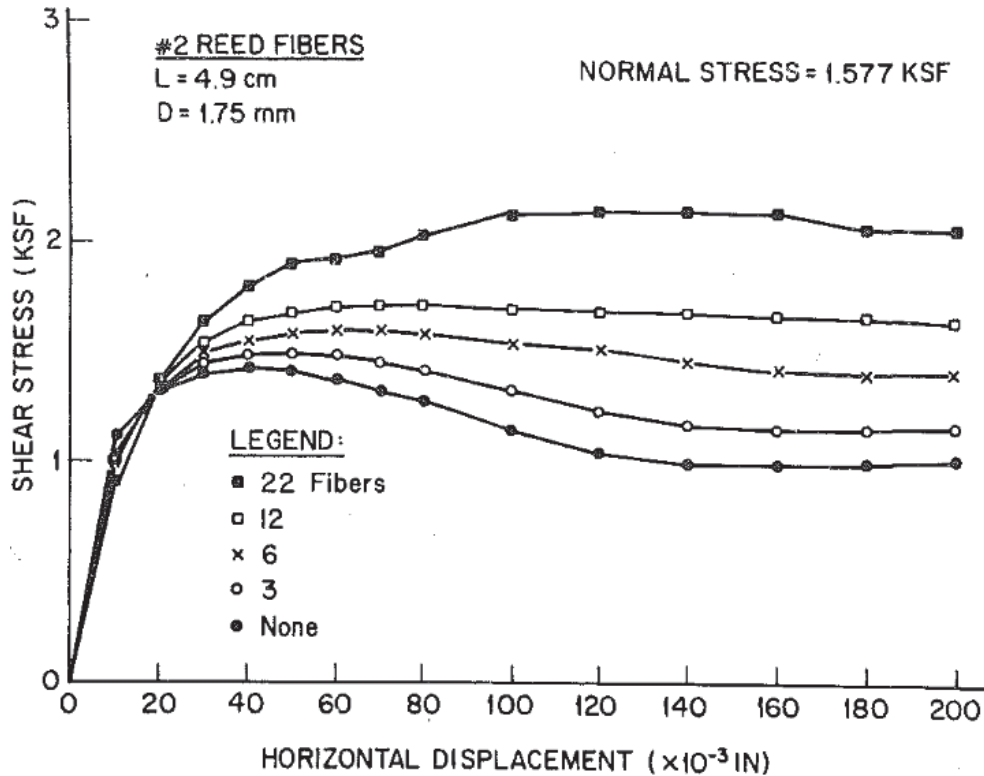
Şekil 3.10 : Çimento ve fiber oranının katkı kum numunelerin serbest basınç dayanımına etkisi (Parto ve Kalantari, 2012).

Gray ve Ohashi (1983) fiber katkının kum zeminler üzerindeki etkisini incelemek için, konudaki ilk çalışmalardan birini yapmışlardır. Temiz kuma, doğal ve sentetik fiber ekleyerek bir dizi kesme kutusu deneyi gerçekleştirmiş, kumun mukavemetindeki ve gerilme davranışındaki değişikliklere ışık tutmuşlardır. Çalışmalarını gevşek (%20) ve sıkı (%100) numuneler üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Araştırdıkları değişkenler arasında; fiber liflerinin boyu, çapı, başlangıçta kayma düzlemiyle yaptıkları aç ve

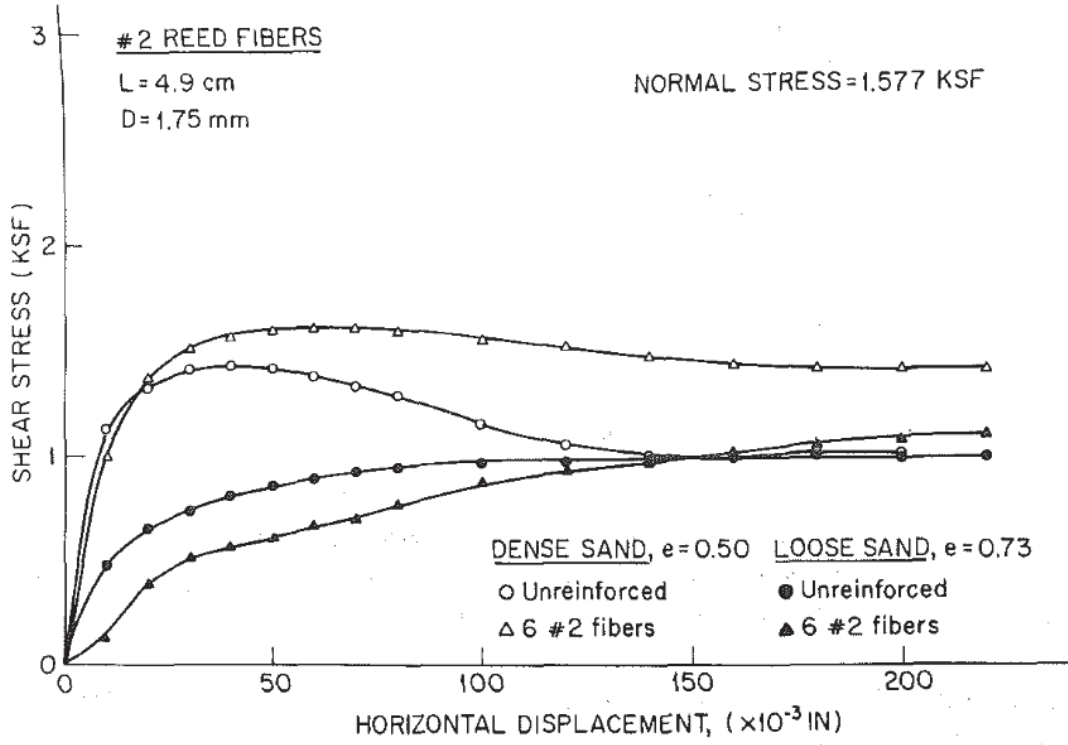
fiber alan oranı yer almaktadır. Fiberlerin dağılımı rastgele değildir. Birbirlerinden eşit uzaklıkta ve belli bir açıdadır.

Deney sonuçlarında, fiber katkının pik kayma gerilmesini arttırdığı ve residuel kayma mukavemetini sınırlandırdığı görülmüştür. Fiber sayısını arttırarak fiber alan oranını %0,25 den %1,67 ye çıkardıklarında, mukavemet artışı daha fazla olmaktadır. Ek olarak, fiberin, düşey deformasyonu azalttığı görülmektedir. Bununla birlikte, gevşek numunelerde iyileşmenin gerçekleşmesi için yüksek yanal deformasyon gerekmektedir. Ayrıca, tüm numuneler için, başlangıç rijitliği azalmış ve düşük deformasyonlarda, katkısız kumda daha yüksek gerilmeler okunmuştur. En iyi sonuçlar, fiber oryantasyonunun 60° olduğu yerleşimlerde elde edilmiştir. Bunu sırasıyla 90° ve 30° lerdeki fiber dağılımları izlemiştir. Daha sonraki çalışmalarında ise, 90° lik dağılımın rastgele fiber dağılımına eşdeğer olduğu sonucuna varmışlardır.

Şekil 3.11’de fiber kesit alanı ile numune alanı oranının Şekil 3.12’de farklı sıklıktaki numunelerin, sabit normal gerilmede yüklenen deney sonuçlarına etkisini gösteren kayma gerilmesi yatay yerdeğiştirme grafiği yer almaktadır.

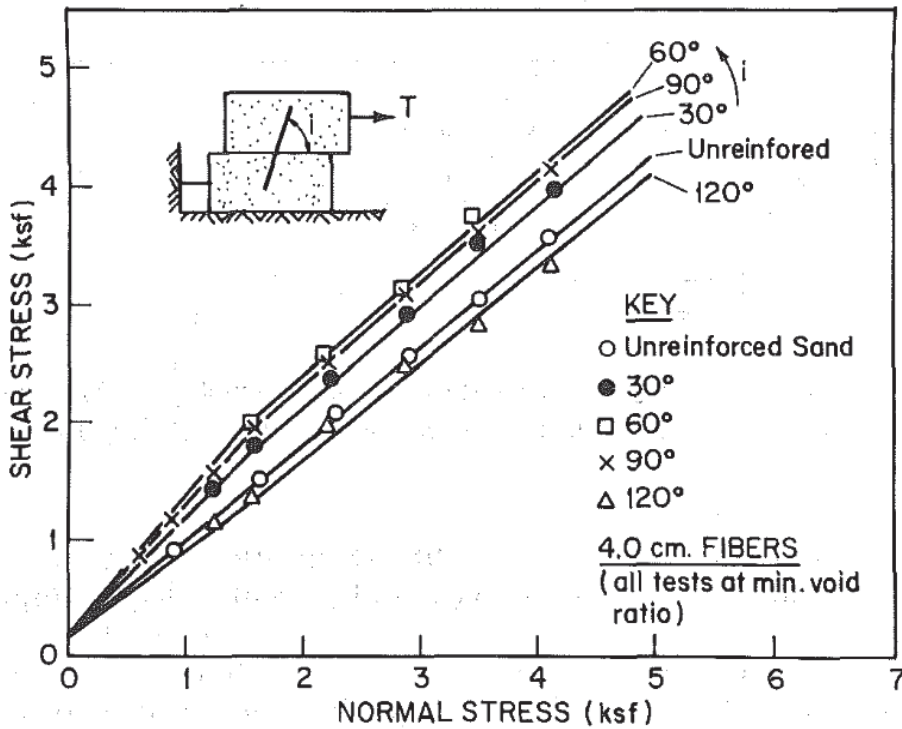


Şekil 3.11 : Fiber miktarının (fiber alan oranının) kayma mukavemetine etkisi (Gray ve Ohashi, 1983).



Şekil 3.12 : Sıklığın fiber katkılı kum numunelerin kayma davranışına etkisi (Gray ve Ohashi, 1983).

Şekil 3.13'de, fiberin kayma düzlemi ile yaptığı açının kırılma zarfı üzerindeki etkisi görülmektedir.



Şekil 3.13 : Fiber liflerinin oryantasyon açısının kırılma zarfına etkisi (Gray ve Ohashi, 1983).

3.3 Fiber Katkılı Zemin Matrisi Üzerine Analitik Çalışmalar

Fiber katkılı zemin kütlelerinin kayma mukavemeti özelliklerini ve gerilme şekil değiştirme gibi karakteristik özelliklerini deneysel çalışmalar ile görmek mümkündür. Fakat, günümüzde sektörde sıklıkla kullanılan bilgisayar desteği ile, çeşitli yazılımlar kullanarak sistemin modellenebilmesi için analitik çözümlerin veya ilişkilerin de bilinmesi gerekmektedir.

Görünürde, fiber malzemesi zemine göre yüksek elastikite modülüne sahiptir. Ek olarak, zeminlerin daneli yapısı dolayısıyla bulunduramadığı çekme dayanımına üzerinde barındırır. Örneğin, deneyde kullanılan Masterfiber ürünü 5.38 GPa elastisite modülüne ve 300 MPa çekme dayanımına sahiptir. Betonarme yapıların imalatında kullanılan nervürlü S420 donatısının çekme dayanımının 500 MPa olduğu düşünülürse, fiber malzemesinin taşıyabileceği çekme kuvveti daha rahat kavranabilmektedir.

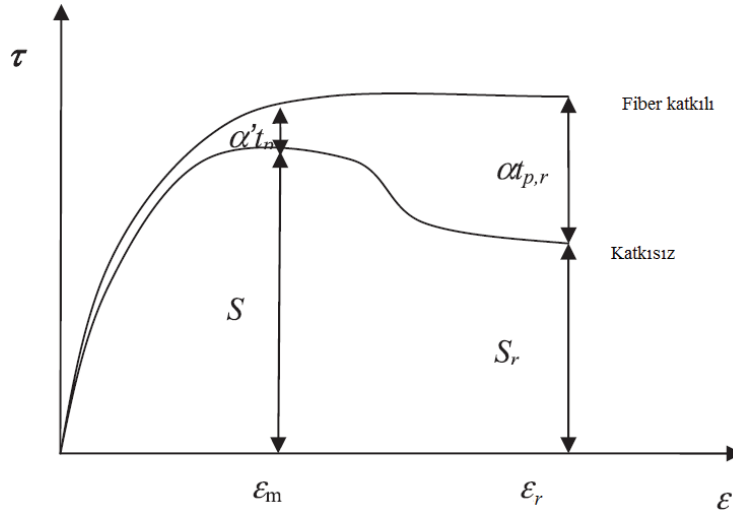
Betonarmede çelik donatılarının performansının, betonla beraber davranışına bağlı olduğu gibi, aynı durum fiber katkılı zeminlerde de geçerlidir. Fiber katkılı zeminlerden bahsedilirken “donatılandırılmış” zemin ifadesi de pek çok kez kullanılmaktadır. Zemin kütleindeki davranış değişikliği ve mukavemet parametrelerinin gelişimi dane – fiber arası aderans ve fiber dağılımı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Başka bir deyişle, zeminde iyileşme görülebilmesi için, öncelikle fiber liflerindeki taşıdığı kuvvetlerin mobilize olması gerekmektedir. Mobilizasyon derecesi arttığı takdirde, zeminin mühendislik özellikleri de gelişim artış göstermektedir.

Zornberg ve Li (2013), birbirilerinden ayırık dağılmış fiber katkılı zeminlerin kayma mukavemetini tahmin edebilen bir taslak önerisi yapmıştır. Verdikleri method zemin ve fiber özelliklerini esas alarak, katkılı zemin kütlelerinin eşdeğer mukavemet özelliklerini zemin matrisinin kayma mukavemeti ve fiber lifleri ile taşınan gerilmenin bileşimi olarak sunmaktadır (Denklem 3.16).

$$S_{eq} = S + \alpha \cdot t \quad (3.16)$$

İfadelerde S_{eq} fiber ile donatılandırılmış zemin matrisinin toplam kayma mukavemetini göstermektedir. S , zeminin kendi mukavemetini temsil etmektedir ve Denklem 3.17’de görüldüğü üzere Mohr-Coulomb teorisine göre yazılmıştır. İkinci terim mobilize fiber liflerinin sağladığı mukavemettir. Burada α liflerin kayma

yüzeyine göre oryantasyon açısına bağlı ampirik bir ifadedir. t ise fiber lifleri arasında paylaşılan ek kayma gerilmesidir.



Şekil 3.14 : Fiber katkılı zeminlerde, mobilize fiber liflerinin kayma mukavemetine katkısı (Li ve Zornberg, 2013)’den uyarlanmıştır.

Şekil 3.14’de fiberden kaynaklanan kayma muavemeti artışı farklı deformasyon seviyelerine göre gösterilmiştir. Şekilde ϵ_m terimi katkısız numunede pik gerilmenin meydana geldiği deformasyonu, ϵ_r ise residüel durumdaki deformasyonu ifade etmektedir.

$$S_{eq} = c + \sigma \cdot \tan(\phi) + \alpha \cdot t \quad (3.17)$$

Daha önce fiberden kaynaklı mukavemet artışının liflerin mobilize olmasına bağlı olduğundan bahsedilmişti. Bu, Denklem 3.17’deki ikinci terimin farklı değerler alabilmesi ve malzeme özelliklerine göre, bir maksimum değere kadar artabilmesi anlamını taşımaktadır. Kısaca, fiber dağılımı, deformasyon ve yükleme çeşidine göre iki durum ortaya çıkmaktadır. Birincisi, fiber liflerinin kısmi olarak mobilize olduğu durum (Denklem 3.18) ve fiber dayanımının tümüyle mobilize olup maksimum değere geldiği durumdur (Denklem 3.19).

Zornberg (2013), bahsedilen iki durum için dayanımı hesaplamaya yarayan bir önermede bulunmaktadır.

$$t_p = \chi \cdot \eta \cdot (c_{i,c} \cdot c + c_{i,\phi} \cdot \tan(\phi) \cdot \sigma_{n,ave}) \quad (3.18)$$

$$t_t = \chi \cdot \sigma_{f,ult} \quad (3.19)$$

Denklem 3.20 ve 3.23’de sırasıyla kısmi mobilizasyon ve maksimum mobilizasyonda fiber içeren zemin matrisinin kayma mukavemeti görülmektedir. Denklem 3.21, 3.22, 3.24 ve 3.25’de dayanım denkleminde ait parametrelerin bulunuşu gösterilmektedir.

$$S_{eq,p} = c_{eq,p} + \tan(\phi)_{eq,p} \cdot \sigma_n \quad (3.20)$$

$$c_{eq,p} = (1 + \alpha \cdot \eta \cdot \chi \cdot c_{i,c}) \cdot c \quad (3.21)$$

$$\tan(\phi)_{eq,p} = (1 + \alpha \cdot \eta \cdot \chi \cdot c_{i,\phi}) \cdot \tan(\phi) \quad (3.22)$$

$$S_{eq,t} = c_{eq,t} + \tan(\phi)_{eq,t} \cdot \sigma_n \quad (3.23)$$

$$c_{eq,t} = c + \alpha \cdot \chi \cdot \sigma_{f,ult} \quad (3.24)$$

$$\tan(\phi)_{eq,t} = \tan(\phi) \quad (3.25)$$

S_{eq} : Fiber katkılı zeminin eşdeğer kayma mukavemeti

$$\left. \begin{aligned} c_{i,c} &= \frac{a}{c} \\ c_{i,\phi} &= \frac{\tan(\delta)}{\tan(\phi)} \end{aligned} \right\} \text{Zemin-malzeme etkileşim katsayıları}$$

a : Zemin ve fiber arası adhezyon terimi

c, ϕ : Katkısız zeminin mukavemet parametreleri

t : Fiber liflerinin paylaştığı kayma gerilmesi

α : Fiberlerin açısına bağlı ampirik bir katsayı

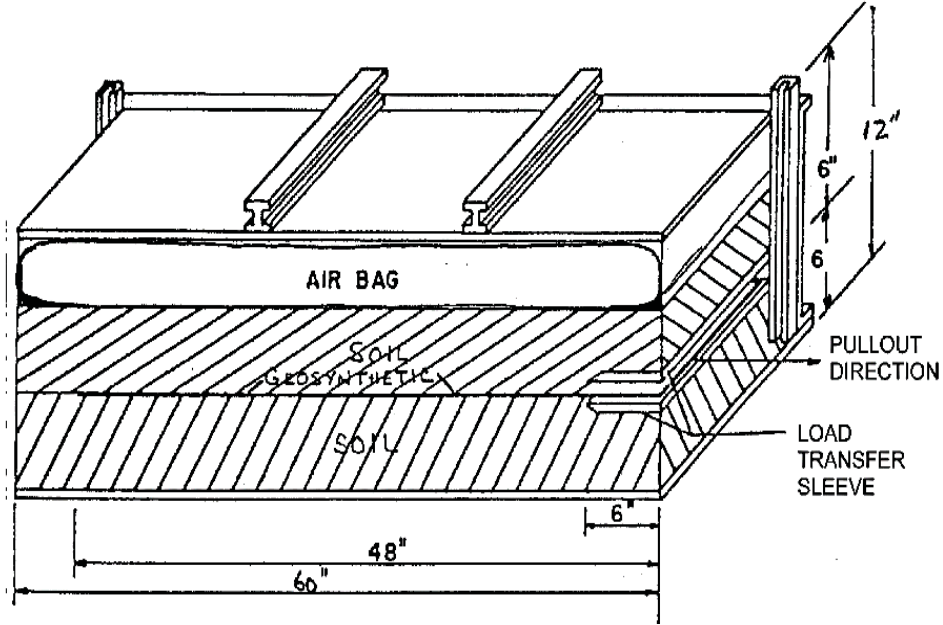
η : Boy/Çap Oranı

χ : Zemindeki hacimsel fiber oranı

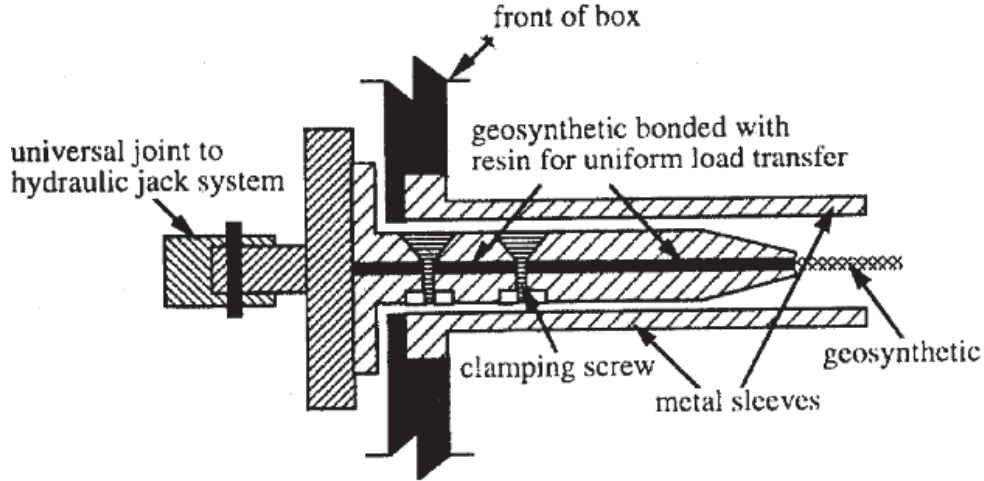
Yukarıda yer alan parametrelerden a , ya da başka bir deyişle, fiber ile zemin daneleri arayüzeyindeki kayma mukavemetinin bulunmasını sağlaya parametre, modifiye edilmiş bir çekme düzeneği kullanılan lif çekme deneyi (fiber pullout test) yapılarak bulunmaktadır.

Deney düzeneğinde birbiri üzerine oturan üst ve alt kutular arasına yerleştirilen tekil fiber lifleri üzerine hidrolik aktüatör yardımıyla normal gerilme uygulanır. Başka bir hidrolik aktüatör ise, plastik borular içerisinde yer alan fiber üzerine çekme kuvveti uygular.

Deneyde, düzeneğin ön ve arkasında bulunan mikrometreler ile yatay deformasyonlar ve bunlara bağlı oluşan çekme kuvveti ölçülmektedir. ASTM standardında yer alan çekme deney düzeneği Şekil 3.15 ve Şekil 3.16’da görülmektedir.



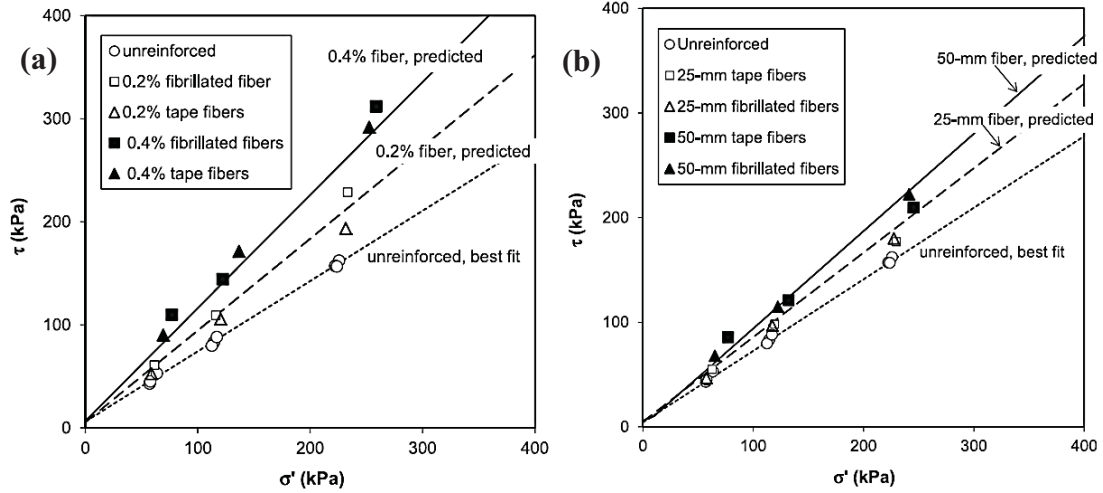
Şekil 3.15 : Pullout deney düzeneği (ASTM D6706, 2001).



Şekil 3.16 : Pullout deney düzeneğindeki yükleme gömleği detayı (ASTM D6706, 2001).

Zornberg ve Li (2013), belirtilen formüllerin doğruluk ve tutarlılığını incelemek üzere, teorik olarak hesaplanan değerler ile deneysel sonuçları karşılaştırmıştır. Çalışmada, 25 ve 50 mm uzunluğunda fiber boylarına sahip, ağırlıkça %0,2 ve 0,4 oranlarında fiber içeren ve %48 ve 65 sıklıktaki kötü derecelendirilmiş katkılı kuru kum numuneler üzerinde üç eksenli basınç deneyleri uygulanmıştır.

Şekil 3.17’de fiber katkılı zemin matrisi üzerine geliştirilen teorik ifadelerden hesaplanan normal ve kayma gerilmelerinin, üç eksenli deney sonuçlarından elde edilelerek çizilen kırılma zarflarıyla karşılaştırması verilmiştir. Karşılaştırma 25 ve 50 cm’lik fiber uzunluğuna ve ağırlıkça %0,2 ve 0,4 fiber oranına göre değerlendirilmiştir.



Şekil 3.17 : Teorik zemin-fiber matris modelinin deneysel çalışmalarla karşılaştırılması: (a) %0,2 ve %0,4 fiber oranlarına göre. (b) 25 ve 50 mm fiber boyutlarına göre.

Gray ve Ohashi (1983), fiber katkılı zeminlerin modellenmesinde karmaşık sonlu eleman analizlerinin yerine, gerilme ve deformasyon durumlarının, denge denklemi bağıntıları yardımıyla da incelenebileceğini ortaya atmışlardır. Oluşturdukları model, potansiyel kayma düzleminin her iki tarafına eşit miktarda uzanan uzun elastik bir fiber içermektedir. Fiberin kayma düzlemini ile yaptığı açı dik olabileceği gibi, keyfi bir “ i ” değerine de sahip olabilmektedir (Şekil 3.18). Önceki kısımda da anlatıldığı gibi, burada da, kesme halinde meydana gelen deformasyon sırasında fiberin çekme direnci mobilize olmaya başlamakta ve zeminde mukavemet artışı sağlamaktadır. Kayma deformasyonuna karşı, fiberde burkulma direnci oluşmadığı varsayılmaktadır.

Denklem 3.26 ve 3.27’de fiberden kaynaklı mukavemet artışının (ΔS_R), fiberin oryantasyonuna göre sırasıyla dik ve herhangi bir “ i ” açısı durumundaki ifadeleri verilmiştir. İfadelerde t_R birim alanda fiberlerin mobilize çekme dayanımını göstermektedir.

$$\Delta S_R = t_R [\sin\theta + \cos\theta \cdot \tan\phi] \quad (3.26)$$

$$\Delta S_R = t_R [\sin(90-\psi) + \cos(90-\psi)\tan\phi] \quad (3.27)$$

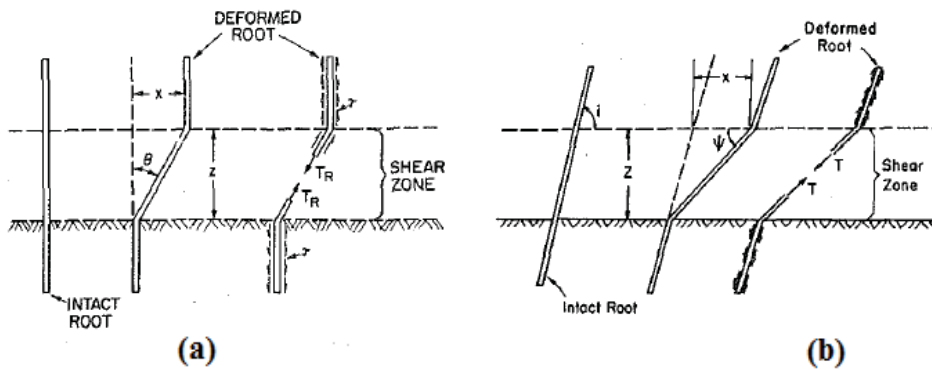
$$\psi = \tan^{-1} \left[\frac{1}{k + (\tan^{-1} i)^{-1}} \right] ; k = x/z \quad (3.28)$$

- ϕ : Zeminin içsel sürtünme açısı.
 θ : Kaymadan dolayı fiberde oluşan distorsiyon açısı
 i : Fiberin kayma yüzeyi ile yaptığı başlangıç açısı
 x : Yatay yer değiştirme
 z : Kaymaya maruz kalan bölgenin kalınlığı
 k : Kayma distorsiyon oranı

İfadelerde, fiberden kaynaklı mukavemet artışının fiber oryantasyonu, kayma bölgesinin geometrisine ve kayma şekil değiştirmesine bağlı olduğu görülmektedir. Bunların dışında, mukavemet artışına fiber özelliklerine bağlı olarak, fiberin mobilize çekme dayanımının da etkisinin olduğu açıktır. Bu değer, Denklem 3.29'da görüldüğü üzere tahmin edilebilmektedir.

$$t_R = \left(\frac{A_R}{A} \right) \sigma_R \quad (3.29)$$

İfade de A_R/A fiber kesite alanının zemin alanına oranı, σ_R ise kayma yüzeyinde bulunan fiber lifinde oluşan çekme gerilmesini göstermektedir. σ_R fiberin elastisite modülü, dane ve fiber arayüzündeki sürtünme ve fiber çapı gibi özelliklere bağlı olarak bulunabilmektedir. Şekil 3.18'de ilk olarak, kayma düzlemine dik ve kayma düzleminin normaliyle bir "i" açısı yapan giber liflerinin, kayma sırasındaki iç kuvvetleri gösterilmektedir.



Şekil 3.18 : Kayma durumundaki fiberin deformasyonu ve mobilize çekme direnci (Gray ve Ohashi, 1983): (a) Kayma düzlemine dik. (b) Kayma düzlemiyle "i" açısı yapan.

4. YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

4.1.1 Kum

Yapılan çalışmalarda, İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Malzemeleri laboratuvarından temin edilen Akpınar kumu ve ince, temiz silika kumu kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların öncesinde kum 102°C sıcaklığındaki etüvde bekletilerek kurutulmuş ve ASTM standardına göre 10 numaralı elekten elenmiştir (Şekil 4.4).

Her iki kum da, birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi (USCS) kullanılarak, kötü derecelenmiş kum (SP) olarak sınıflandırılmıştır. Deneyler sırasında kullanılan kum tiplerine ait görsel Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Fiziksel özellik deneyleri sonrasında yapılan incelemelere göre, malzeme özellikleri belirlenmiştir. Çizelge 4.1’de silika kuma ait çeşitli malzeme özellikleri gösterilmiştir. Çizelge 4.2’de ise aynı özelliklerin Akpınar kumuna ait sonuçları verilmiştir. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de, sırasıyla, silika kum ve Akpınar kumuna ait dane dağılım eğrileri görülmektedir. Eğriler incelendiğinde, Akpınar kumunun, silika kuma göre daha iri dane çapı dağılımına sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.1 : Deneylerin ilk aşamasında kullanılan ince silika kuma ait çeşitli fiziksel özellikler.

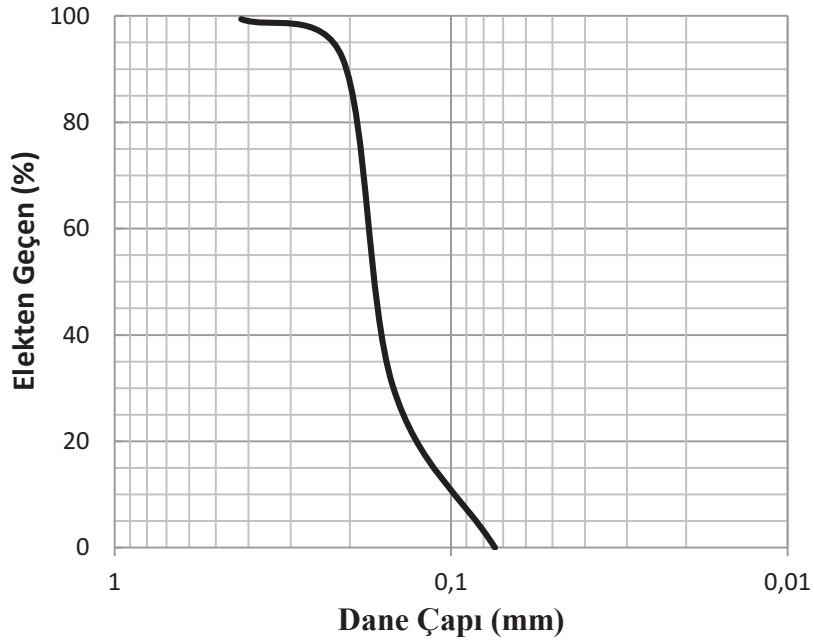
Silika Kumun Fiziksel Özellikleri	
D₆₀	0,17 mm
D₁₀	0,11 mm
D₃₀	0,15 mm
Cu	1,55
Cc	1,20
e_{max}	0,95
e_{min}	0,74
γ_s	2,69
γ_{k,maks}	1,55 g/cm ³
γ_{k,min}	1,38 g/cm ³

Çizelge 4.2 : Deneylerin ikinci aşamasında kullanılan Akpınar kumuna ait çeşitli fiziksel özellikler.

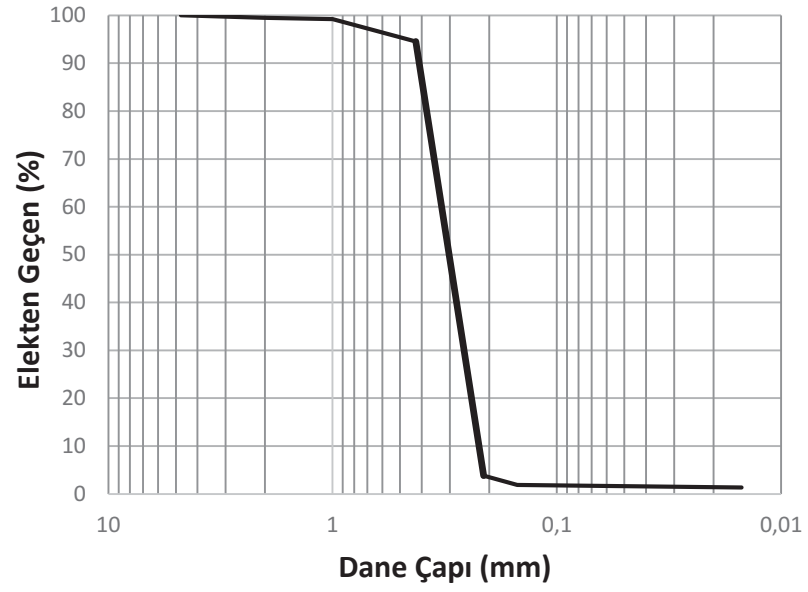
Akpınar Kumunun Fiziksel Özellikleri	
D₆₀	0,34 mm
D₁₀	0,23 mm
D₃₀	0,30 mm
Cu	1,48
Cc	1,15
e_{max}	0,82
e_{min}	0,66
γ_s	2,65
γ_{k,maks}	1,60 g/cm ³
γ_{k,min}	1,46 g/cm ³



Şekil 4.1 : Deneyler sırasında kullanılan silika kum ve Akpınar kumu.



Şekil 4.2 : Deneylerin ilk aşamasında kullanılan ince silika kuma ait dane çapı dağılım eğrisi.



Şekil 4.3 : Deneylerin ikinci aşamasında kullanılan Akpınar kumuna ait dane çapı dağılım eğrisi.



Şekil 4.4 : Kum malzemenin 10 numaralı elekten elenmesi

4.1.2 Çimento

Deneyisel çalışmalarda, İTÜ Yapı Malzemesi laboratuvarlarından temin edilen CEM II tipi çimento kullanılmıştır. Çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler üreticiden

temin edilmiştir ve Çizelge 4.3’de gösterildiği gibidir. Kullanılan malzemeye ait Türk standardı TS EN 197-1:2012 dir.

Çizelge 4.3 : CEM II çimentosuna ait özellikler.

CEM II/A-P 42.5 R		
Priz Başlangıcı	175 dk	min. 60 dk
Priz Sonu	226 dk	-
Hacim Genleşmesi	1,00 cm	maks. 10 cm
Özgül Ağırlık	5124 cm ² /g	-
Litre Ağırlığı	840 g/l	-
2 Günlük Dayanım	25,8 MPa	min. 20 MPa
28 Günlük Dayanım	54,5 MPa	min. 42,5 - maks 62,5 MPa
SO ₃	% 2,92	maks. % 4
Cl-	> % 0,01	maks. % 0,1

4.1.3 Fiber

Fiber katkılı zeminler, rastgele dağılımlı birbirlerinden ayrık fiber elemanlar içeren zemin kütleleridir. Hafif, dayanıklı ve yüksek dayanımlı yapıya sahiptirler. Zeminlerin mekanik davranışlarında ve mukavemet özelliklerinde iyileştirme sağlar, kayma gerilmesine sebep olan kesme kuvvetine karşı, kayma direnci göstererek yanal ötelenmeleri azaltır ve kayma dayanımını arttırlar. Geoteknik problemlerinde, düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir çözümler sunarlar. Sentetik olarak üretilbildikleri gibi, doğadan da temin edilebilirler.

Fiber katkılı zeminlerin kullanım alanlarına örnekler:

- Ulaştırma yapıları
- Yol yapımı
- Drenaj koşullarının kontrolü
- Erozyona karşı
- İstinat ve iksa sistemleri
- Sızıntı kontrolü
- Zemin donatısı olarak

Fiber katkıların yapısında bulunan materyaller;

- Polypropylene
- Polyolefin
- Polyethylene
- Polyester
- Cam fiber
- Doğada bulunan diğer lifli materyaller

Yapılan çalışmaların ilk aşamasında cam fiber malzemesi kullanılmıştır. Sonrasındaki aşamalarda ise BASF firması tarafından üretilen Masterfiber 15 MF kullanılmıştır. Ürün, lifli yapıda polypropylene fiberden oluşmaktadır. Yaygın kullanım alanlarında; donatılı ve donatısız döşemeler, asfalt üzeri ince beton örtüleri, mimari prekastlar, şev stabilizasyonu, su arıtma tesisleri ve sulama kanalları bulunmaktadır. ASTM C 116/C standardına uygun üretilmektedir. Yapılarda mikro ve makro çatlak mekanizmasını iyileştirmekte, plastik oturmayı azaltmakta, servis ömrünü uzatmakta ve geçirgenliği azaltmakta yararları bulunmaktadır. Tipik tel donatıların yerine kullanılabilmeyle birlikte, yük taşıyan çelik donatıların yerine kullanılması önerilmemektedir.

Zemin içerisine eklenen fiber katkının, zemin kütlesi içerisine rastgele olarak dağılmasına özen gösterilmiştir. Bu yöntem, zeminlerin lokal iyileştirilmesinde, düzlemsel iyileştirme tekniklerinin arazi şartları nedeniyle zorlu olduğu koşullarda tercih edilmektedir. Çizelge 4.4’de deney sırasında kullanılan fiber çeşitlerine ait özellikler verilmiştir.

Çizelge 4.4 : Masterfiber 15 MF ve cam fiber katkısına ait özellikler.

Masterfiber 15 MF		E-Glass Fiber	
Özgül Ağırlık	0,91	Özgül Ağırlık	2,62
Erime Noktası	160 °C	Elastisite Modulu	81,3 Gpa
Yanma Noktası	590 °C	Çekme Dayanımı	3450 Mpa
Emme	-	Yumuşama Sıcaklığı	830 °C
Alkali Dayanımı	Yüksek	Sıvılaşma Sıcaklığı	1065 °C
Çekme Dayanımı	300 MPa	Uzanim	%4,9
Elastisite Modulu	5,38 GPa		
Uzunluk	19 mm		
Eşdeğer Çap	0,66 mm		

4.2 Deneysel Çalışmalar

Yapılan çalışmalarda, kum numunelerinin farklı fiber ve çimento katkılarıyla kayma mukavemeti parametrelerinin ve davranışının değişimi incelenmiş, zemin iyileştirmesi bakımından niteliği araştırılmıştır. Uygulamalarda sırasıyla kumun kuru ağırlığına %2,5, 5,0 ve 1,0 oranlarında fiber, %5,0, 10,0 ve 15,0 oranlarında çimento kullanılmıştır.

Mekanik özellik deneylerinin öncesinde, numunenin fiziksel özelliklerinin bulunması amacıyla elek analizi, piknometre ve rölatif sıklık deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden alınan verilerin ardından, zeminin statik mukavemet özelliklerini araştırıcı deneylere geçilmiştir.

Yalnızca fiber kullanılan numuneler üzerinde direkt kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Sonrasında, kesme kutusundan alınan bulgular ışığında, çimento katkısı eklenmiş ve numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri uygulanmıştır. Tüm deneyler, İstanbul Teknik Üniversitesi Hamdi Peynircioğlu laboratuvarlarında yapılmıştır.

Kesme kutusu deneylerinde, iki farklı kum tipi ve iki farklı fiber türü kullanılmıştır. İlk deney setlerinde, beyaz silika kumu ve cam fiberi (glass fiber) denenmiştir. Cam fiberin, numune içerisinde homojen dağılımının sağlanmasındaki güçlükler, kum ile aderansının az olması dolayısıyla iyileştirmenin görece olarak yetersiz görülmesi ve diğer sentetik fiberlere göre daha maliyetli olması sebebiyle, ikinci set deneylerde dane büyük dane boyutuna sahip Akpınar kumu ve daha ince olan Polypropylene fiber kullanılmıştır. Yine, bu fiber türü kullanılarak çimento katkılı deneyler yapılmıştır.

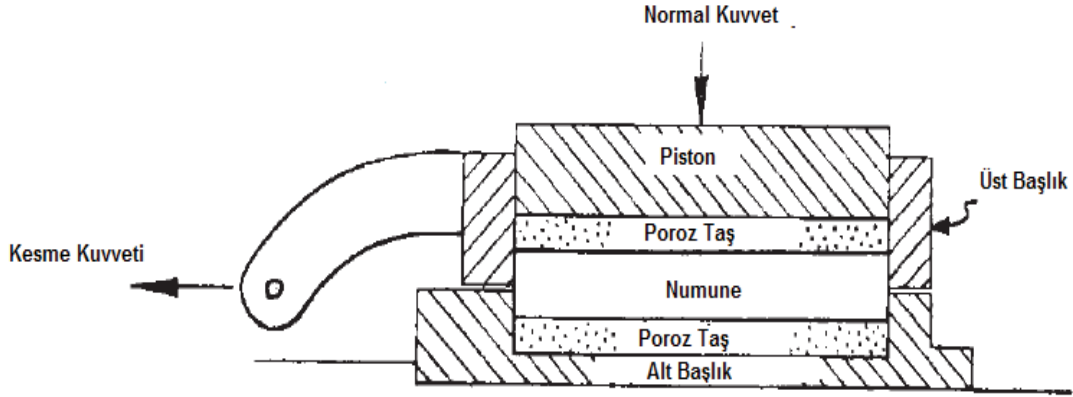
4.2.1 Kesme kutusu deneyleri

Kesme kutusu, kare ya da dairesel kesit alanına sahip numunenin metal bir kutuya yerleştirilerek, yatay ekseninde ayrılabilen başlıklardan birinin kesme yönünde hareket etmesi sonucu, düzlem şeklinde bir kayma yüzeyinin oluşması ve bu düzlemdeki normal ve kayma gerilmelerinin hesaplanması, kırılma zarflarının çizilmesine dayanır.

Yükleme öncesinde, numuneye, arazi şartlarını temsil eden, kırılma zarfının yeter nitelikte çizilmesine olanak sağlayacak sayıda normal gerilme uygulanır. Konsolidasyon şartlarına göre, belirli bir süre normal gerilme altında tutulan

numunenin, kesme aşamasında düşey ve yatay yer değiştirmesi ve aldığı kesme kuvveti not edilir.

Doygun numune ile çalışırken, numune altına ve üstüne poroz taşlar yerleştirilir. Kuru numuneler de ise rijit plakalar kullanılabilir. Deney sırasında drenaj şartları kontrol edilememektedir ve boşluk suyu basıncı ölçülememektedir.



Şekil 4.5 : Kesme kutusunun şematik gösterimi (ASTM D3080, 2003).

Öncelikli olarak beyaz silika kum ve cam fiber kullanılarak yapılan deneyler, sonrasında Akpınar kumu ve PP fiber seçilerek tekrarlanmıştır. İlk deney setlerinde İTÜ Geoteknik laboratuvarlarında 6x6x2.5 ölçülerindeki deney düzenekleri kullanılmıştır. ASTM 3080 standardı izlenmiştir.

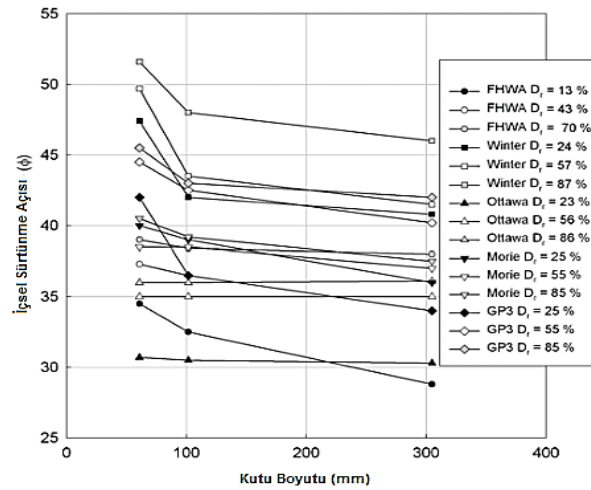
İkinci set deneylere, daha büyük ölçüde olan, 10x10x2.5 boyutlarında kesme aparatlarıyla başlanmıştır. Büyük ölçülerin seçilmesindeki amaç, rastgele fiber dağılımının daha homojen yapılabilmesidir. Fakat, bu ölçülerde, aynı kayma gerilmelerinin sağlanabilmesi için fazla kuvvet uygulanması gerekmesi, yaklaşık 2.78 katı (Denklem 4.1), ve katkılı zemin numunelerinde artan normal yükleme değerleriyle, kesme kuvvetinin kuvvet halkasının limit değerine yaklaşması dolayısıyla, sonradan yine 6x6x2.5 ölçülerindeki kesme kutusuna dönmüştür.

$$\frac{T_{10}}{T_6} = \frac{\tau A_1}{\tau A_2} = \frac{100}{36} = 2,78 \quad (4.1)$$

Başka bir sebep ise, numune boyunun 6 cm'den 10 cm'ye çıkmasıyla, gerekli yatay deformasyon miktarının artması ve %20 deformasyona (2 cm)'e ulaşamamasıdır. Ek olarak, büyük alanlı kesme kutusundan alınan sonuçlar, tipik kesme kutusu alanı olan 36 cm² ile karşılaştırıldığında, daha küçük içsel sürtünme açılarının elde edildiği görülmektedir (Çizelge 4.5).

Cerato ve Lutenegger (2006), farklı ölçülerdeki kesme kutularının ve dolayısıyla, farklı numune boyutlarının, kesme kutusu sonuçlarına etkisini araştırmışlardır. Önceki yapılan çalışmalarda, Tezaghi'nin taşıma gücü formülündeki, N_γ taşıma gücü faktörünün temel kısa kenar boyutuna bağlı olmadığını, fakat literatürdeki çalışmaların bu durumun aksini gösterdiğini öne sürülmektedir. Kesme kutusu deneyinde de bu durum söz konusudur. Bu bağlamda, 5 farklı kum numunesi üzerinde; 60, 101.6 ve 304.8 mm ölçülerinde kesme kutusu deneyleri yapmıştır. Deneylerde gevşek, orta sıkı ve sıkı numuneler kullanılmıştır.

Deney sonuçlarında, içsel sürtünme açısı ile numune ölçüleri arasında bir boyut faktörü olduğunu göstermişlerdir. Boyut faktörü, kum tipinde, normal yükleme miktarından ve sıklıktan da etkilenmektedir (Şekil 4.6). Kutu boyutları arttırıldığı takdirde, sözü eden faktörlerin de etkisiyle, içsel sürtünme açısında düşüş görülmektedir.

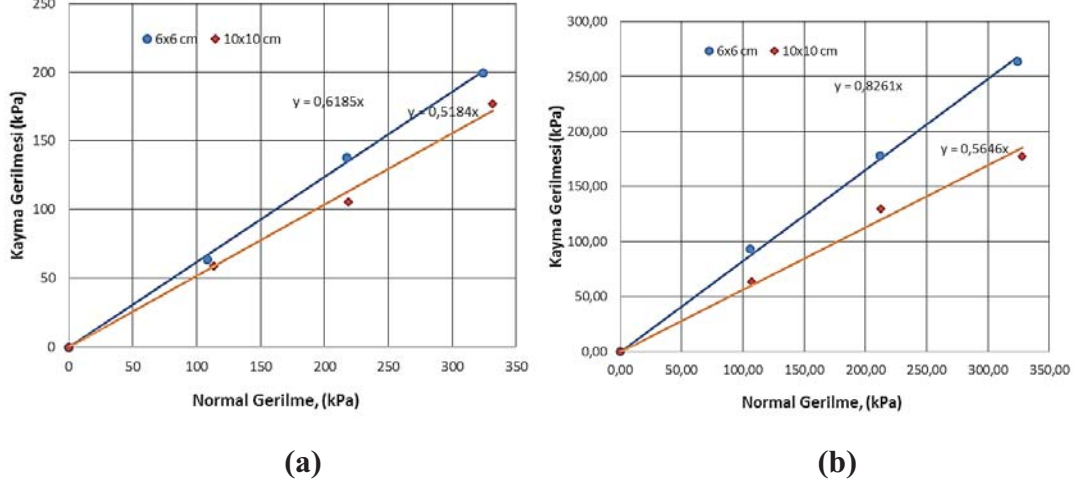


Şekil 4.6 : Kesme kutusu boyutlarının içsel sürtünme açısına etkisi (Cerato ve Lutenegger, 2006).

Çizelge 4.5 : Kesme kutusu boyutlarının içsel sürtünme açısına etkisi.

Kesme Kutusu Boyutları (mm)	Başlangıç Alanı (mm ²)	Sıklık (%)	İçsel Sürtünme Açısı (°)
6x6x2.5	36	20	27
		60	30
10x10x2.5	100	20	32
		60	39

Çizelge 4.5 ve Şekil 4.7’de çalışmalar sırasında, 36 cm² ve 100 cm²’lik yüzey alanına sahip kesme kutuları kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen kırılma zarflarının karşılaştırılması verilmiştir. Kırılma zarflarının eğimlerinden görüleceği üzere, büyük kayma alanın sahip kesme kutusu daha küçük sürtünme açılarının hesaplanmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.7 : 6x6 ve 10x10 cm ölçülerindeki kesme kutularının a) gevşek b) sıkı numunelerin kırılma zarfı üzerindeki etkisi.

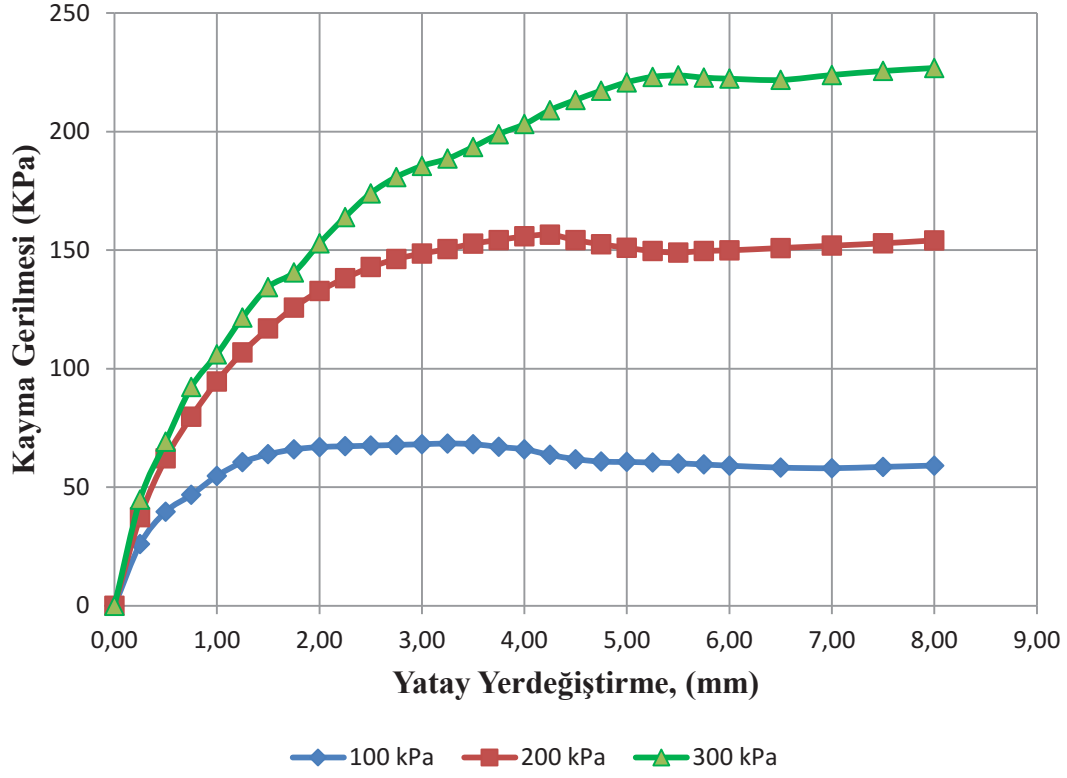
4.2.1.1 Silika kum ve cam Fiber kullanılarak gerçekleştirilen deneyler

Kesme kutusu deneylerinin başlangıcında, ince dane boyutuna sahip beyaz silika kum ve cam fiber malzemeleri denenmiştir. Numuneler gevşek ve sıkı durumu temsil etmesi açısından %20 ve 60 sıklıklarda hazırlanmıştır. Fiber malzemesi, kumun kuru ağırlığınca %0,25 ve %0,50 oranlarında eklenmiştir.

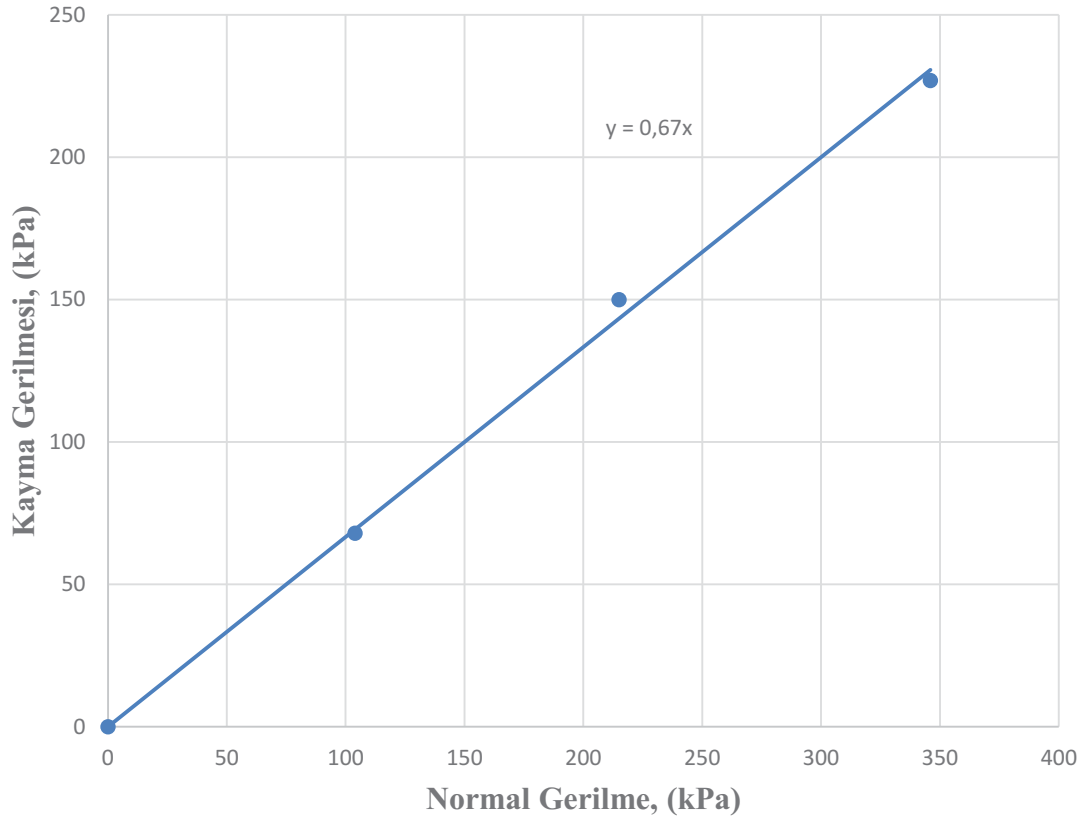
Numunelerin hazırlanması sırasında, cam fiberin ince kum daneleri arasında rastgele dağılımının sağlanmasında zorluklar yaşanmıştır. Ayrıca oluşturulan zemin fiber matrisi içerisinde, malzemeler arası aderansın zayıflığı nedeniyle, zemin kütlesinin birlikte hareket etmeyerek fiberlerin ayrıştığı gözlemlenmiştir.

Cam fiberin göreceli olarak pahalı ve zor temin edilen bir malzeme oluşu da göz önüne alınarak, çalışma içeriği tekrar gözden geçirilmiş ve sonraki deneylere daha kaba daneli olan Akpınar kumu ve daha ince lif yapısına sahip PP fiber kullanılarak devam edilmiştir.

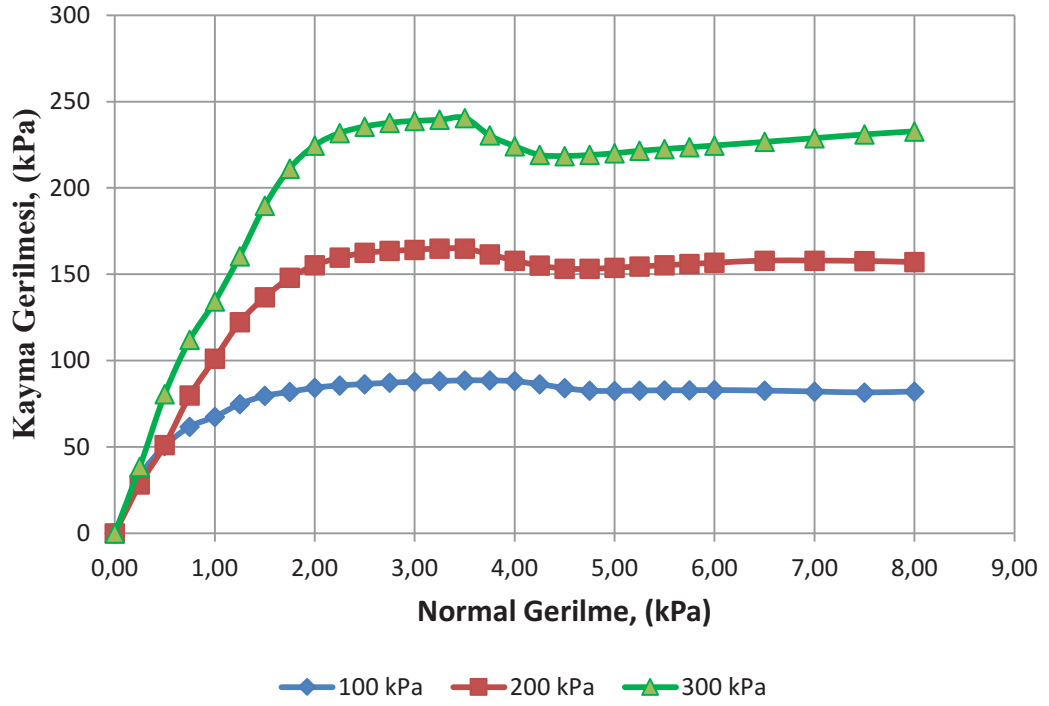
Şekil 4.8 – Şekil 4.19’da fiber katkılı ve katkısız karışımların kayma gerilmesi yatay deformasyon davranışı ve kırılma zarfları verilmektedir.



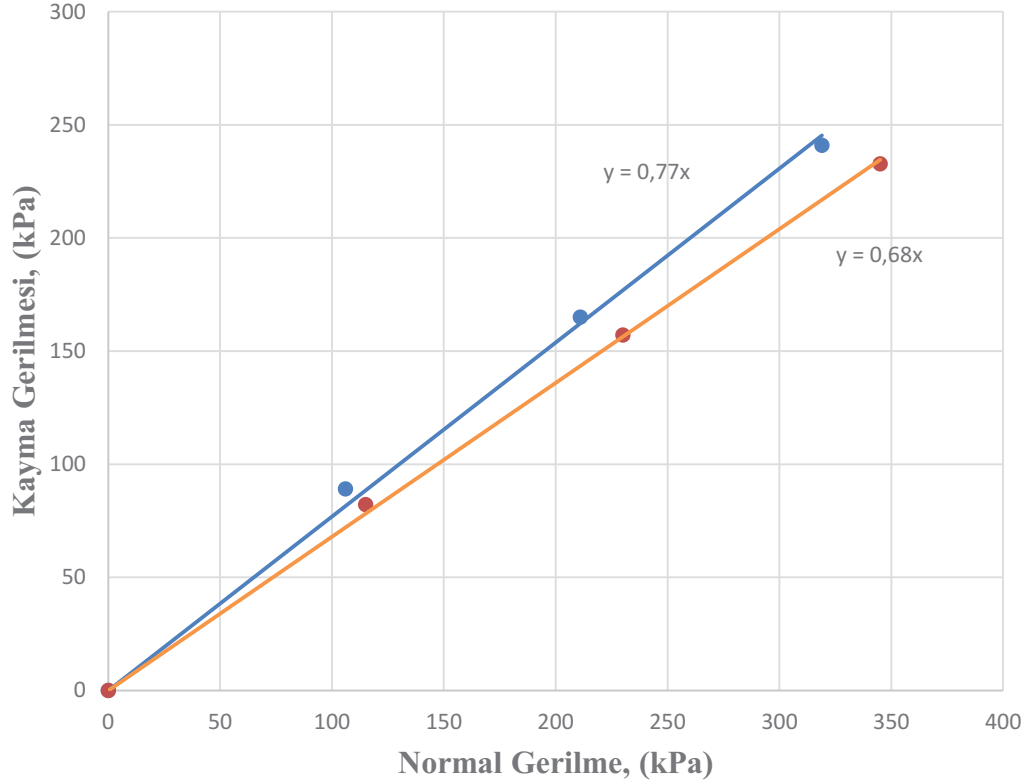
Şekil 4.8 : %20 sıklıkta katkısız numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.



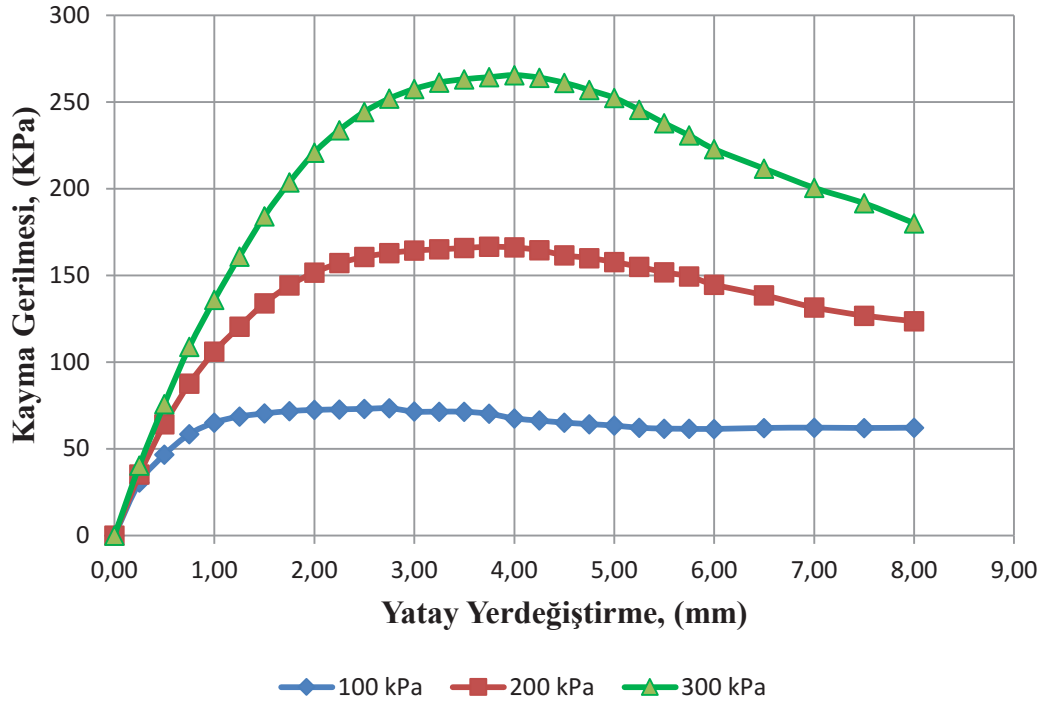
Şekil 4.9 : %20 sıklıkta katkısız numunelerin pik kırılma zarfları.



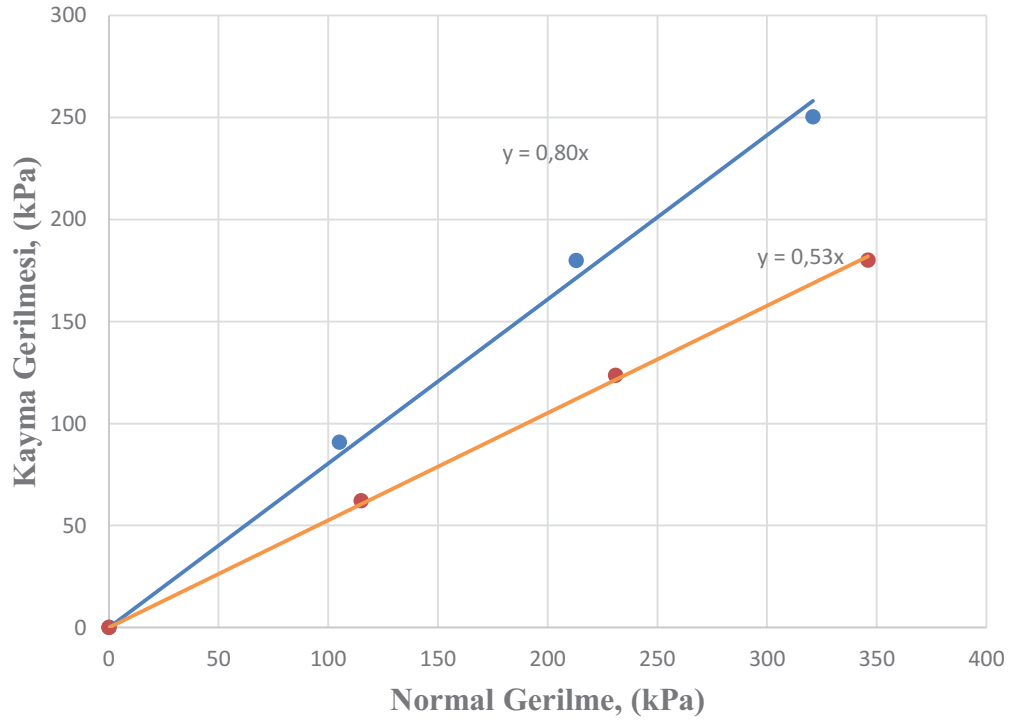
Şekil 4.10 : %60 sıklıkta katkısız numunelerin gerilme şekil değıştirme grafikleri.



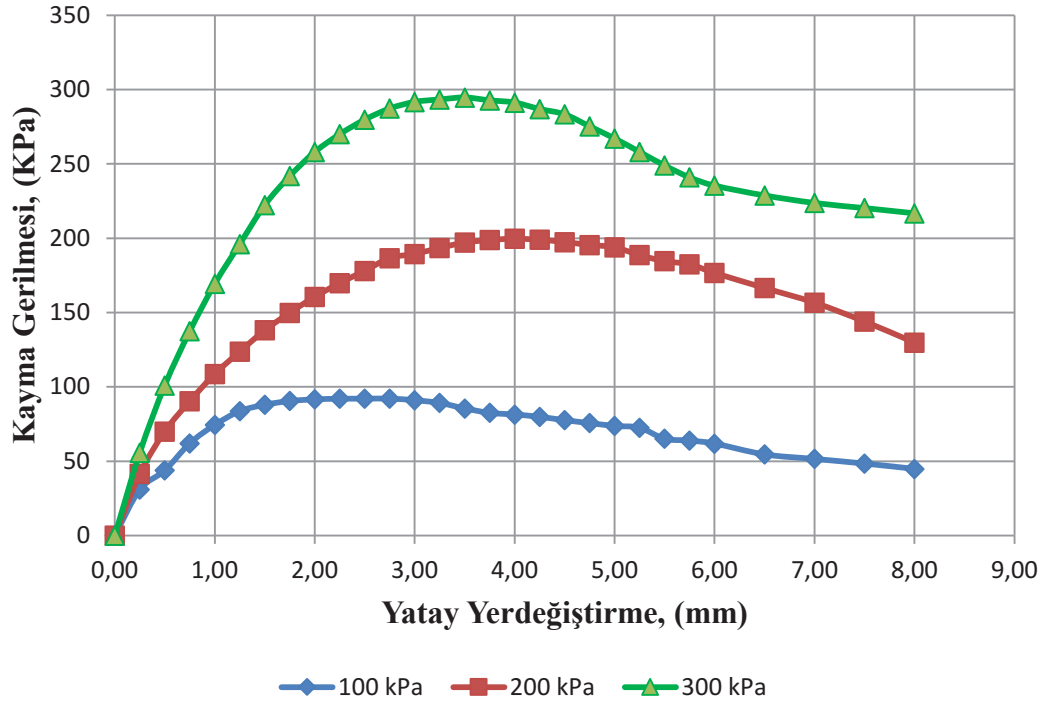
Şekil 4.11 : %60 sıklıkta katkısız numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.



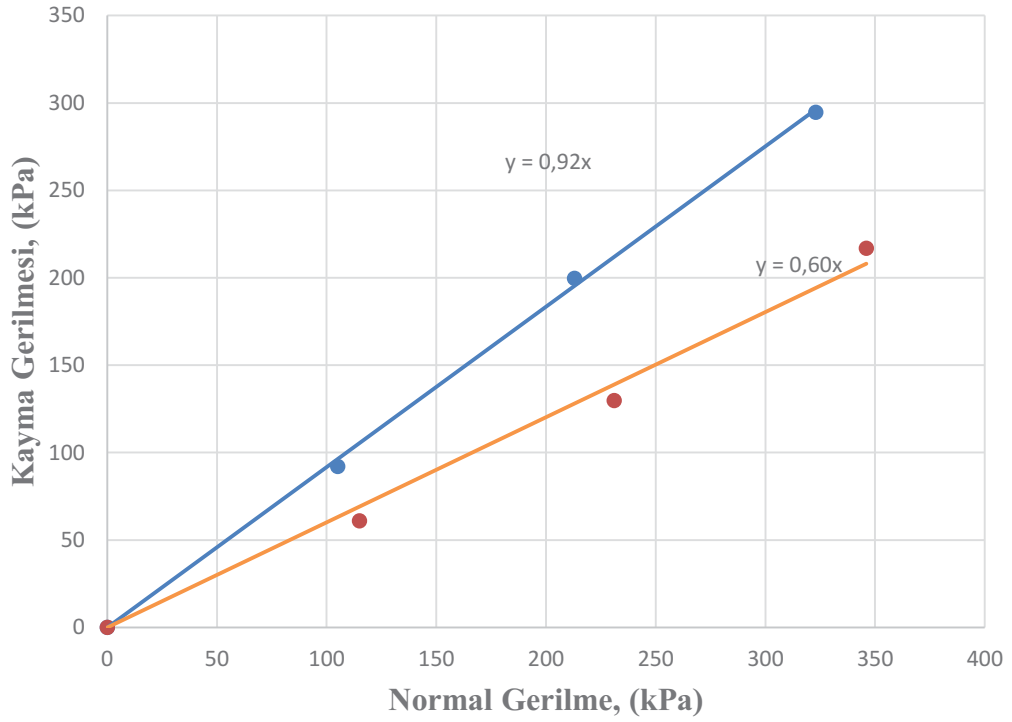
Şekil 4.12 : %20 sıklıkta ve %0,25 fiber oranına sahip numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.



Şekil 4.13 : %20 sıklıkta ve %0,25 oranında fiber katkılı numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.



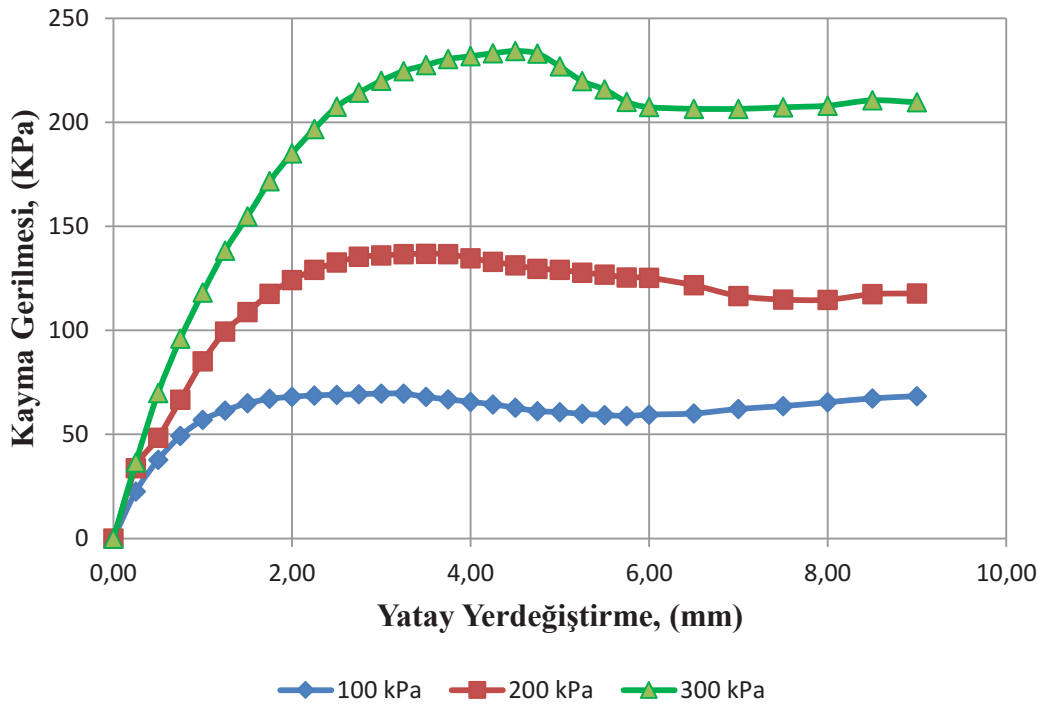
Şekil 4.14 : %20 sıklıkta ve %0,50 fiber oranına sahip numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.



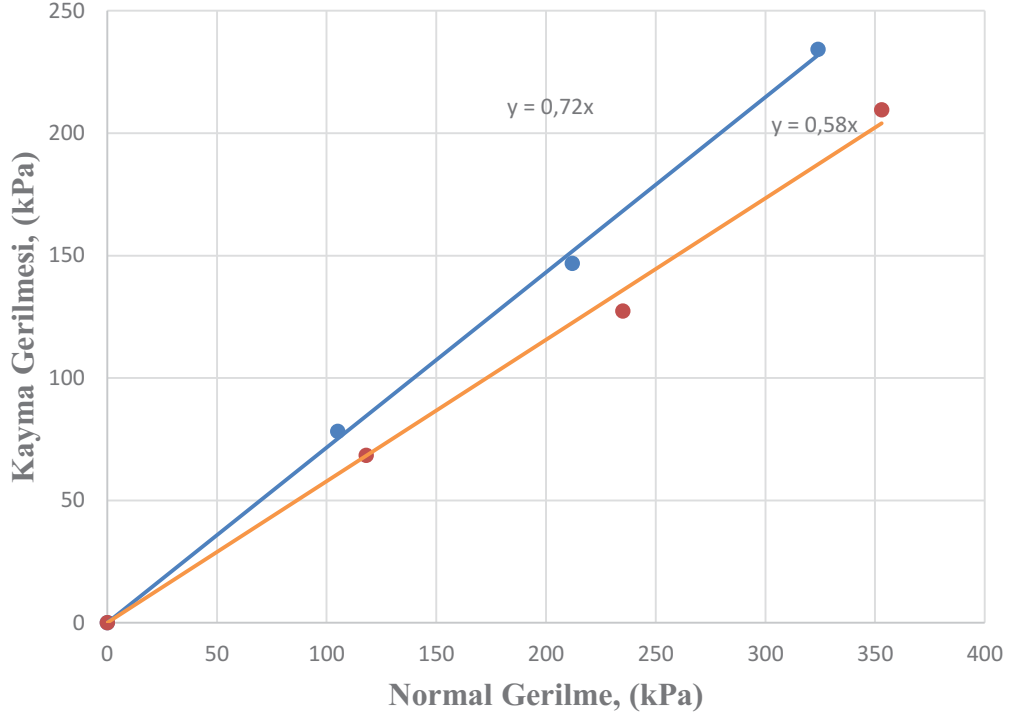
Şekil 4.15 : %20 sıklıkta ve %0,50 oranında fiber katkıli numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.

Silika kum ve cam fiber kullanılarak gerçekleştirilen kesme kutusu deney sonuçlarına göre, kayma düzlemi üzerinde alan düzeltmesi yapıldıktan sonra pik kayma gerilmelerine göre değerlendirilen içsel sürtünme açısı değerleri, katkısız gevşek numuneler için 34° , sıkı numuneler için 38° olarak hesaplanmıştır. Maksimum gerilmeye ulaşıldıktan sonra, yatay yerdeğiştirmenin devam etmesi sonrasında bu değer gevşek ve sıkı numuneler için azalmakta ve her iki sıkılık için de 34° de sabitlenmektedir.

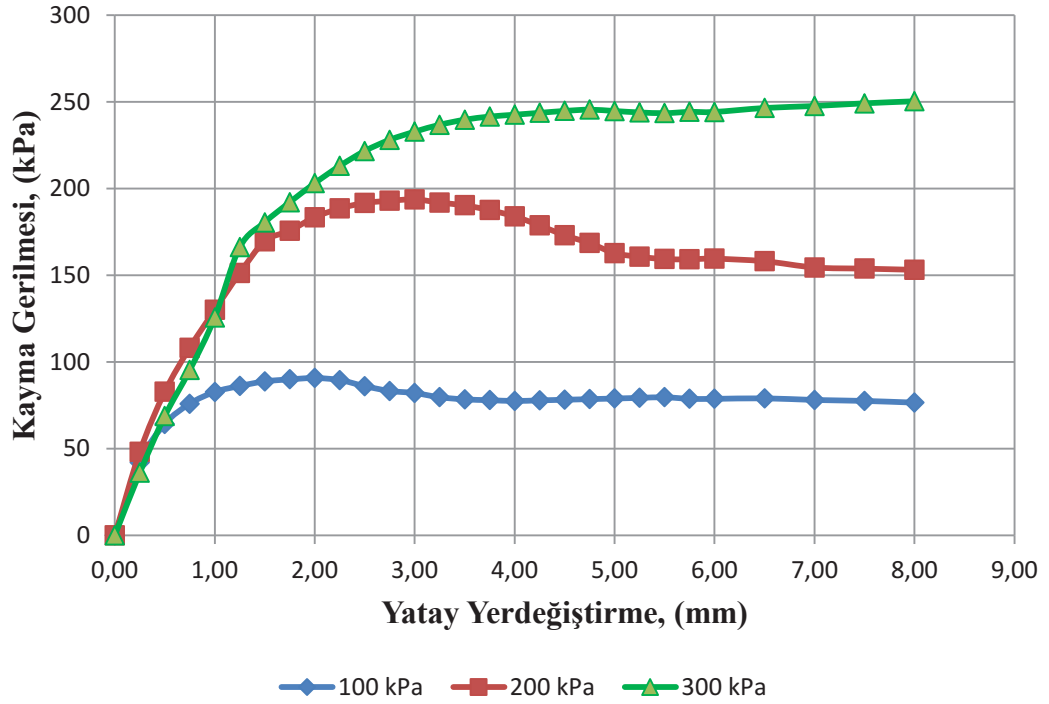
Grafikler incelendiğinde, fiber katkının eklenmesiyle birlikte, pik sürtünme açısında bir artış olduğu söylenilebilir. Fiber katkı, kuru kum ağırlığınca %0.50 oranında kullanıldığında daha iyi sonuçlar doğurmaktadır. Fakat, cam fiberin rijit bir yapı göstermesi; ince silika kum daneleri ile birlikte çalışarak, bir zemin – fiber ağı oluşturmasında güçlükler neden olmakta, malzemeler arası aderansın oluşmasını zorlaştırarak, fiberlerde oluşan kayma direncinin mobilize olmasını bir noktadan sonra engellemektedir. Ayrıca, bu sorun, malzemeler ile homojen bir karışım oluşturulması sırasında da problemler çıkmasına neden olup, tutarlı sonuç alınmasını güçleştirmektedir.



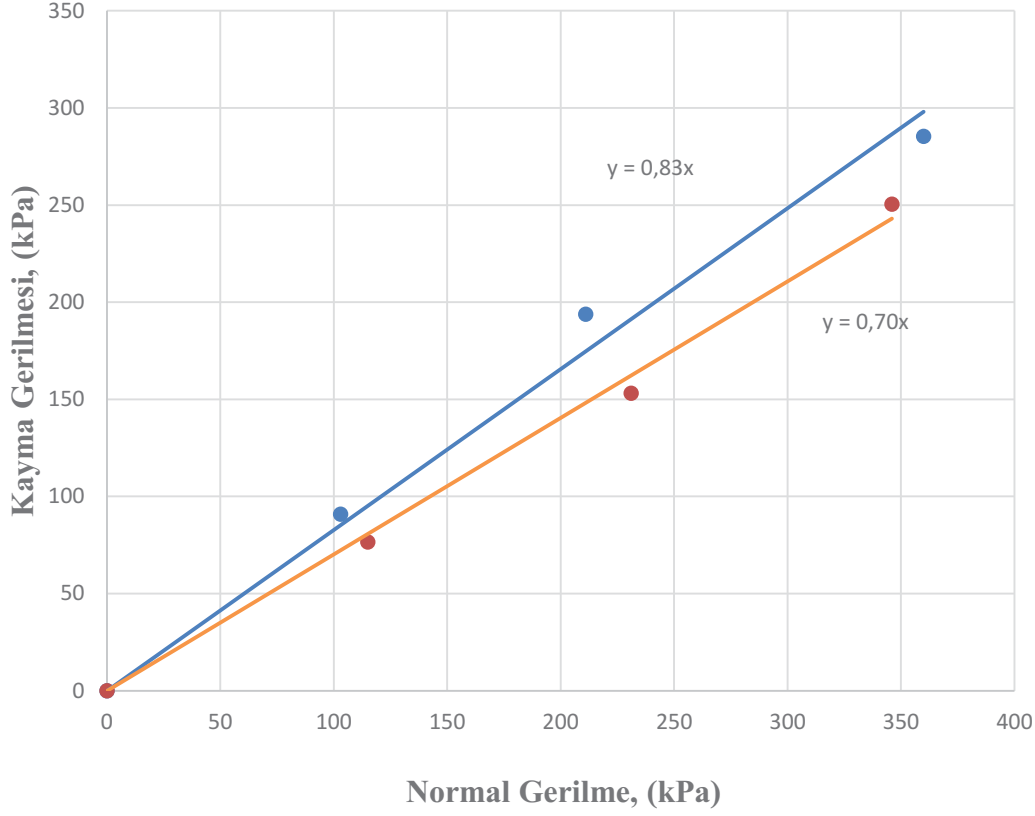
Şekil 4.16 : %60 sıkılıkta ve %0,25 fiber oranına sahip numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.



Şekil 4.17 : %60 sıklıkta ve %0,25 oranında fiber katkıli numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.



Şekil 4.18 : %60 sıklıkta ve %0,50 fiber oranına sahip numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.



Şekil 4.19 : %60 sıklıkta ve %0,50 oranında fiber katkılı numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.

4.2.1.2 Akpınar kumu ve PP fiber kullanılarak gerçekleştirilen deneyler

Kesme kutusu deneylerinin ikinci bölümünde, kullanılan malzemeler değiştirilmiş ve daha büyük dane boyutuna sahip Akpınar kumu ile görünür lif çapı daha ince olan PP tipindeki fiber kullanılmıştır.

Deneylerde, pik gerilmeye erişildikten sonra, artan yatay yerdeğiştirmeye birlikte numunelerde büyük miktarda dilatasyonlar görülmüştür. Bu dilatasyon, numune yüzeyinin eğrilmesine ve yük aktarımının homojenliğinin bozulmasına sebep olmaktadır.

Bu sebepten ötürü, pik gerilmenin sonrasında, kayma gerilmesi belirli bir değerde sabitlenmeden önce, gerilme değişimlerinde hızlı bir düşüş meydana gelmekte ve düşük içsel sürtünme açılarının hesaplanmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte, okunan kayma gerilmesi, büyük yerdeğiştirmelerde sabitlenebilmektedir. Bu sebepten, fiber katkının kırılma sonrası davranışı nasıl etkilediği bakımından, kırılma sonrası sürtünme açıları da grafiklere eklenmiştir. Şekil 4.22 – Şekil 4.37 ‘de fiber katkılı ve katkısız karışımların kayma gerilmesi yatay deformasyon davranışı ve kırılma zarfları

verilmektedir. Deneylerde, her karışım için 100, 200 ve 300kPa'lık normal gerilmeler uygulanmıştır.

Numunelerin kırılma zarflarına bakıldığında, gevşek numunelerde fiber katkının içsel sürtünme açısını arttırdığı görülmektedir. Diğer yandan, sıkı numunelerin pik açısında önemli bir değişim görülmemiştir. Gevşek numunelerde, pik gerilmedeki en büyük gelişim %0.5 fiber kullanıldığında elde edilmiştir. Yalnızca kum bulunan numunede, bu değer 32° iken, %31'lik bir artış göstererek 42°'ye ulaşmıştır.

Kırılma sonrası açılara bakıldığında, hem gevşek hem de sıkı numuneler için bir gelişim görülmektedir. Gevşek numunelerde bu gelişim, %0,5 oranındaki fiber katkı oranına kadar artış göstermiş, 30°'den sonra sabitleşmiştir. Sıkı numunelerde ise en fazla gelişim %107 oranla, kuru ağırlıkça %1,0 oranında fiber katkıyla ulaşılmıştır. Çalışmalar sırasında alınan sonuçların fiber dağılımına da bağlı olduğu gözlemlenmiş ve gerektiği durumlarda deneyler tekrarlanmıştır. Şekil 4.20'de kullanılan kesme kutusu deney düzeneği görülmektedir.

Kayma gerilmesi altındaki davranışa bakıldığında, fiber katkılı numunelerin, maksimum kayma gerilmesine daha büyük şekil değiştirmelerde ortaya çıktığı görülmektedir. Bu durum malzemenin davranışının sünekleştiğini gösterirken, ayrıca fiberden kaynaklanan kayma mukavemeti artışının mobilize olması için önce gerekli şekil değiştirmelerin meydana gelmesi gerektiği şeklinde de yorumlanabilmektedir. Katkılı numunelerin modullerinin daha büyük olduğu görülmektedir.

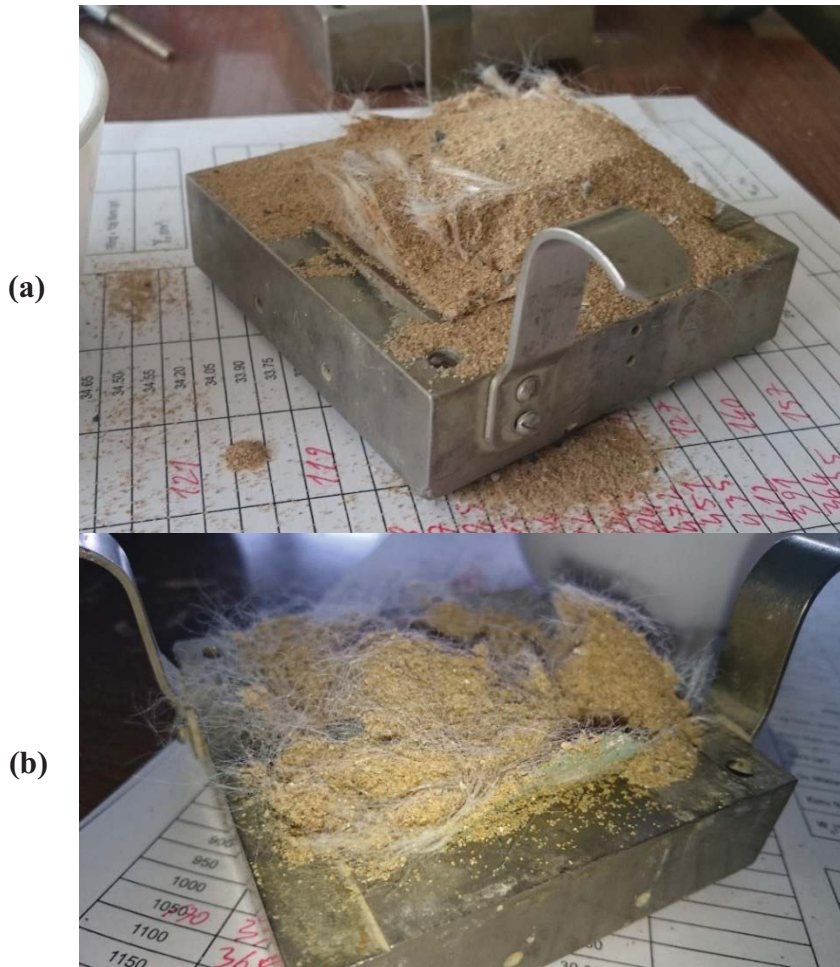


Şekil 4.20 : Kesme kutusu deney düzeneği.

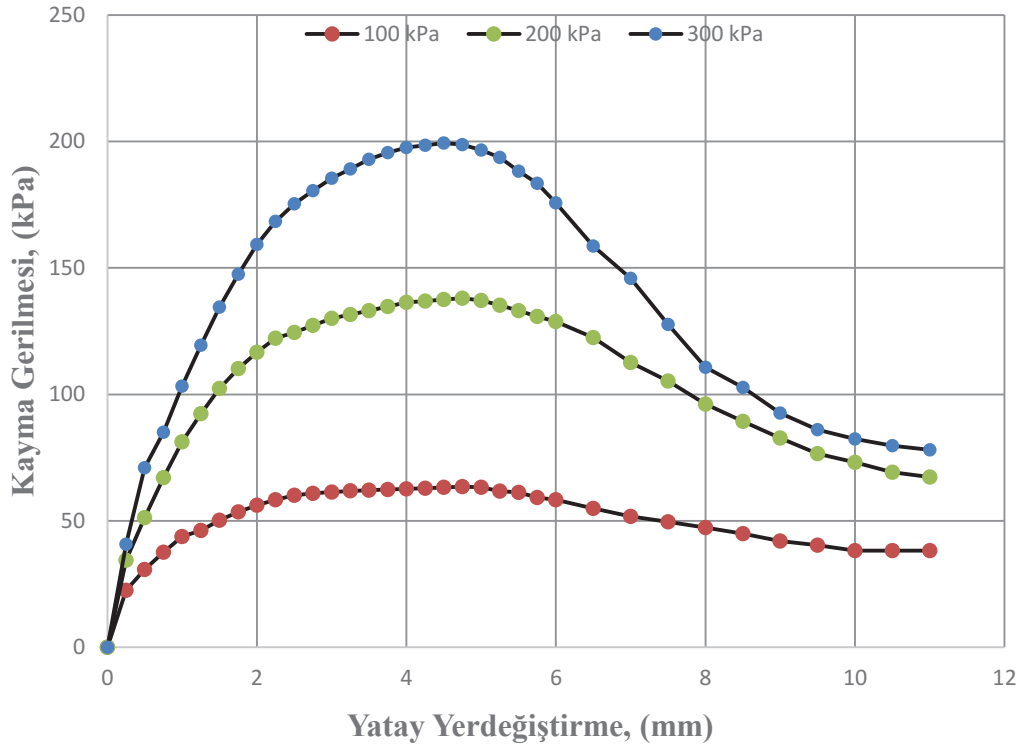
Numunelerin hazırlanışı sırasında, fiziksel özellik deneyleri ve malzeme özelliklerine göre belirlenen oranlar kullanılmıştır. PP fiberin kum içerisinde homojen dağılımının gerçekleştirilmesi için, malzemelerin yoğun karıştırılmasına gerek duyulmuştur. Cam fiber ise daha rijit bir yapıda bulunmakta, bu da cam fiber ve zeminin birlikte çalışıp bir zemin matrisi oluşturmada zorluklara sebep olmaktadır.

Karışımlar dışarıda hazırlanıp kesme kutusu içerisine yerleştirilmiştir. İstenilen sıklıkların sağlanabilmesi için uygun derinlikte olmasına dikkat edilmiş ve numune kalınlığı gönye yardımıyla ölçülmüştür. Gevşek numuneler, kutu içerisine alındıktan sonra bir enerji uygulanmamıştır. Sıkı numuneler ise üç kademede yerleştirilmiş ve aynı miktarda enerji kullanılarak belirli kütlede 2,5 cm kalınlıkta sıkıştırılmışlardır.

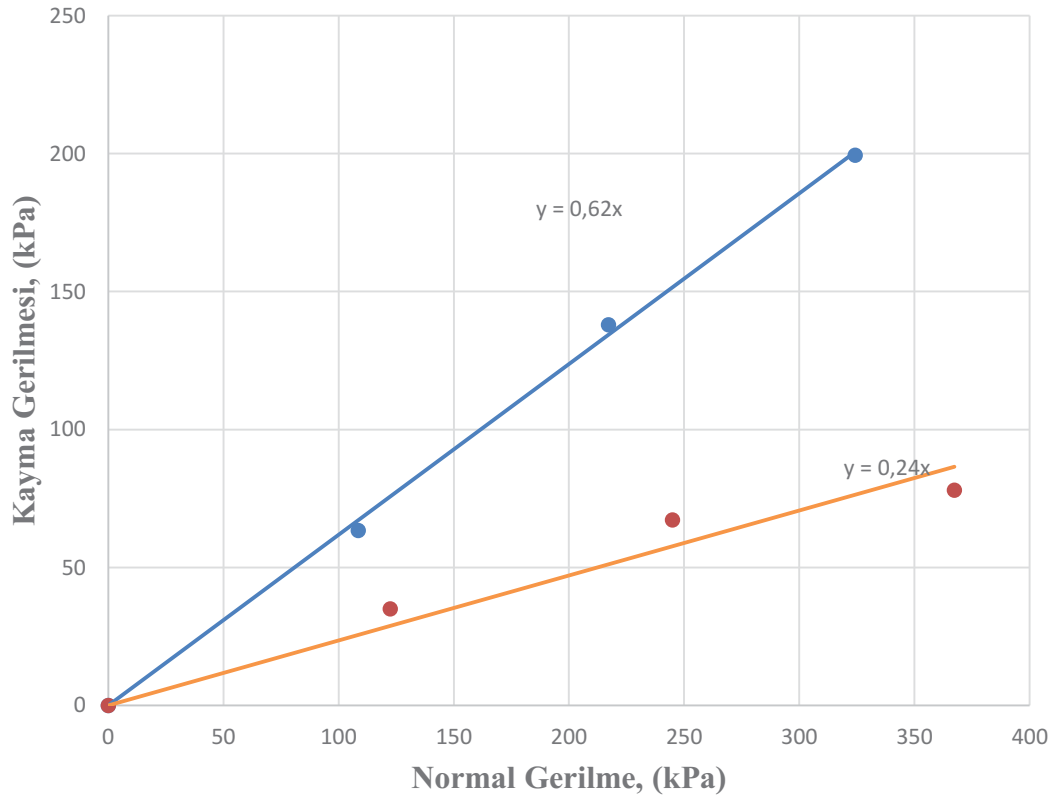
Şekil 4.21a’da deney sonucu yüklemesi boşaltılan ve yerdeğiştirmesi geri alınan bir numune, 4.21b de ise yine deney sonrası, numunenin üst kesme başlığındaki kısmı alındıktan sonra, kayma yüzeyi görülmektedir.



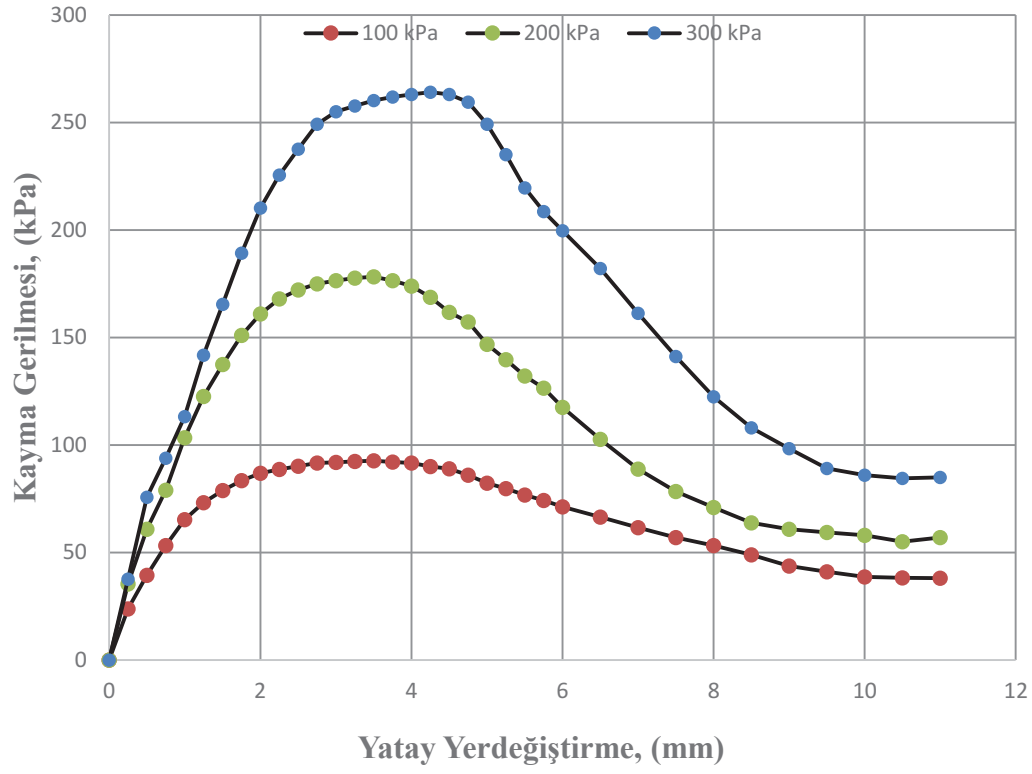
Şekil 4.21 : Fiber katkılı numunelerin deney sonundaki görünüşü: (a) Kırılma sonrası görünüşü ve (b) Kayma yüzeyi detayı.



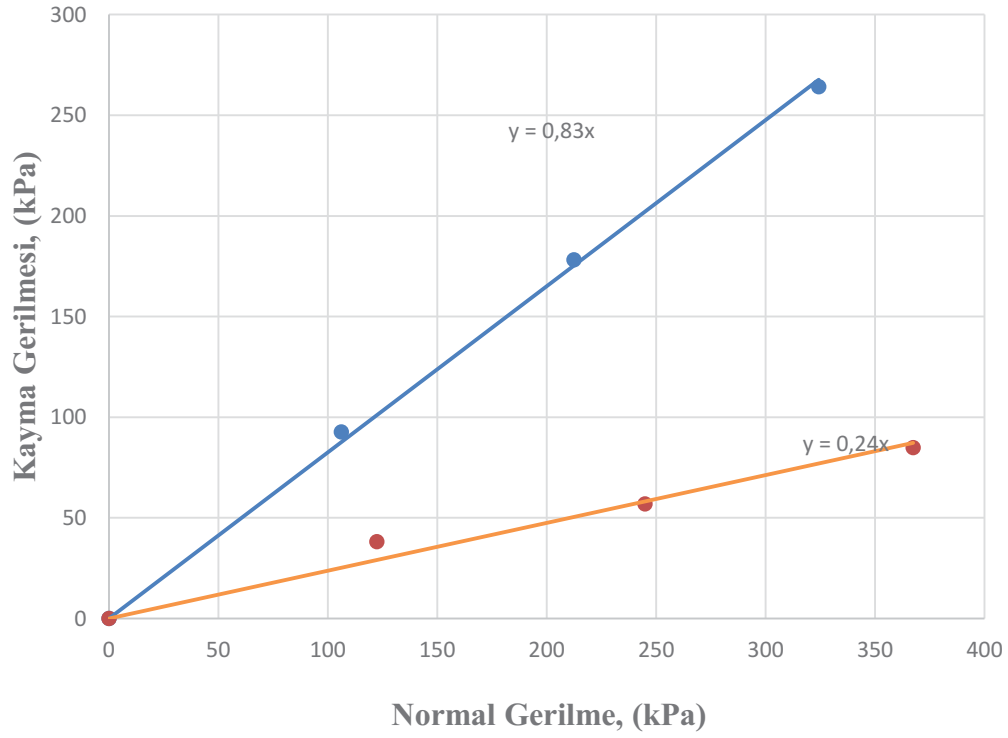
Şekil 4.22 : %20 sıklılıkta katkısız numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri



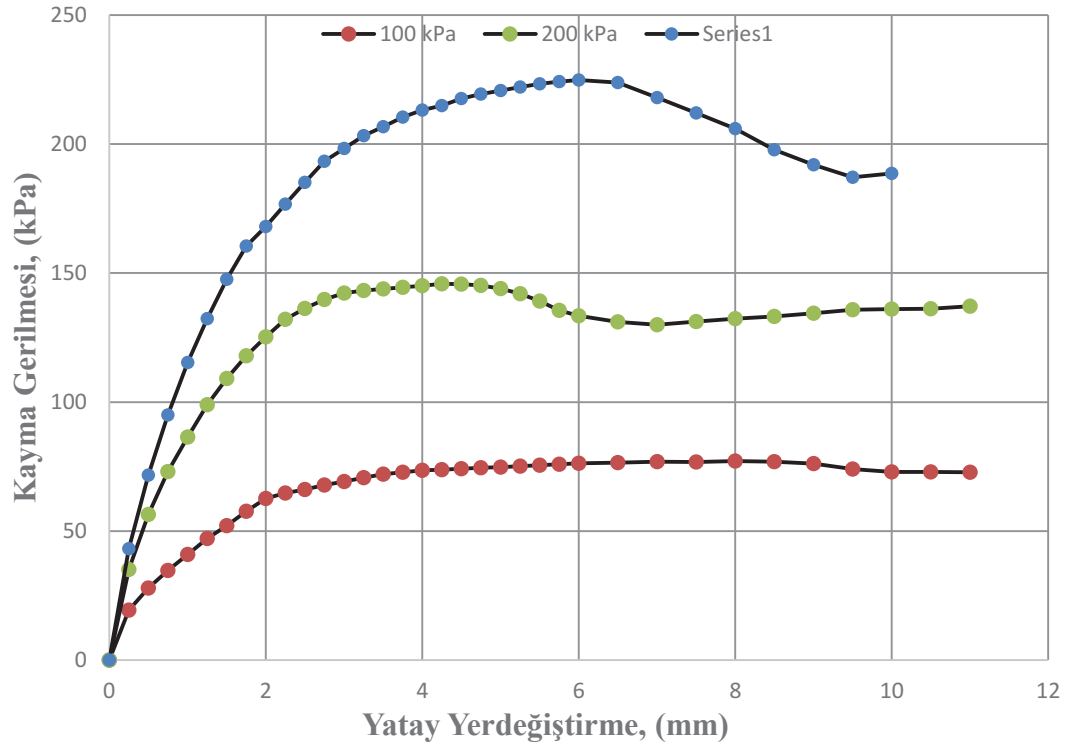
Şekil 4.23 : %20 sıklılıkta katkısız numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları



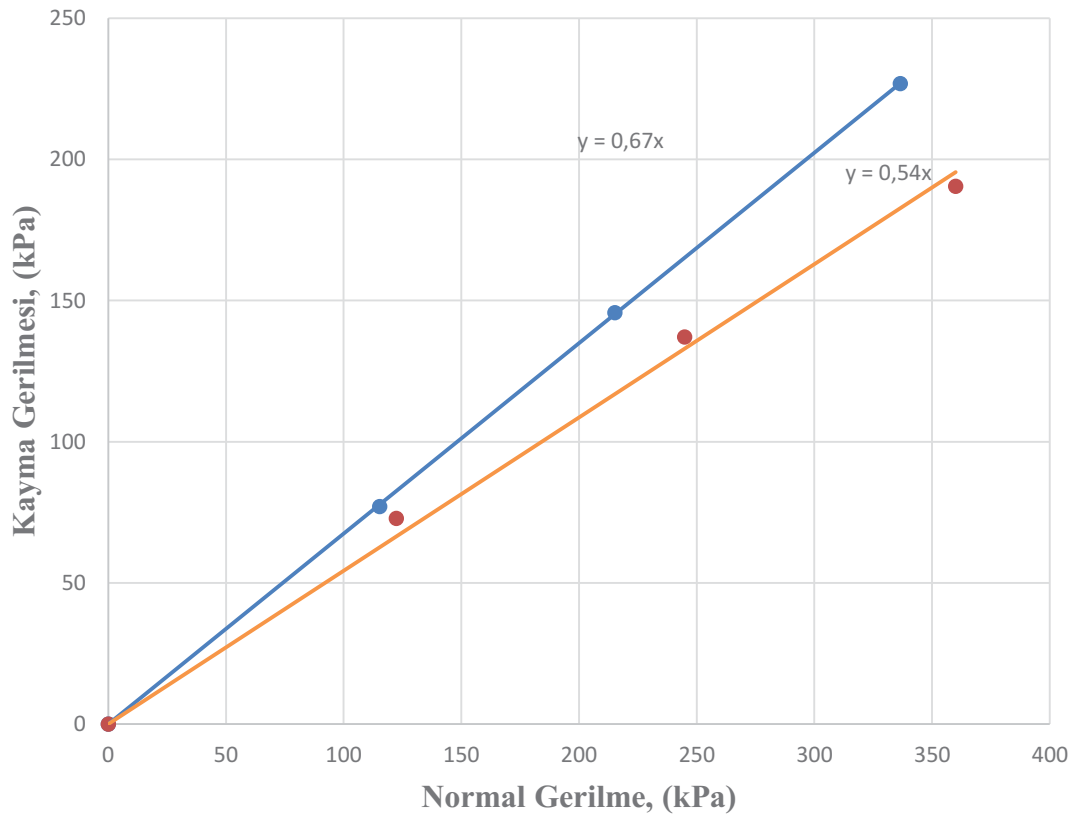
Şekil 4.24 : %60 sıklıkta katkısız numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri



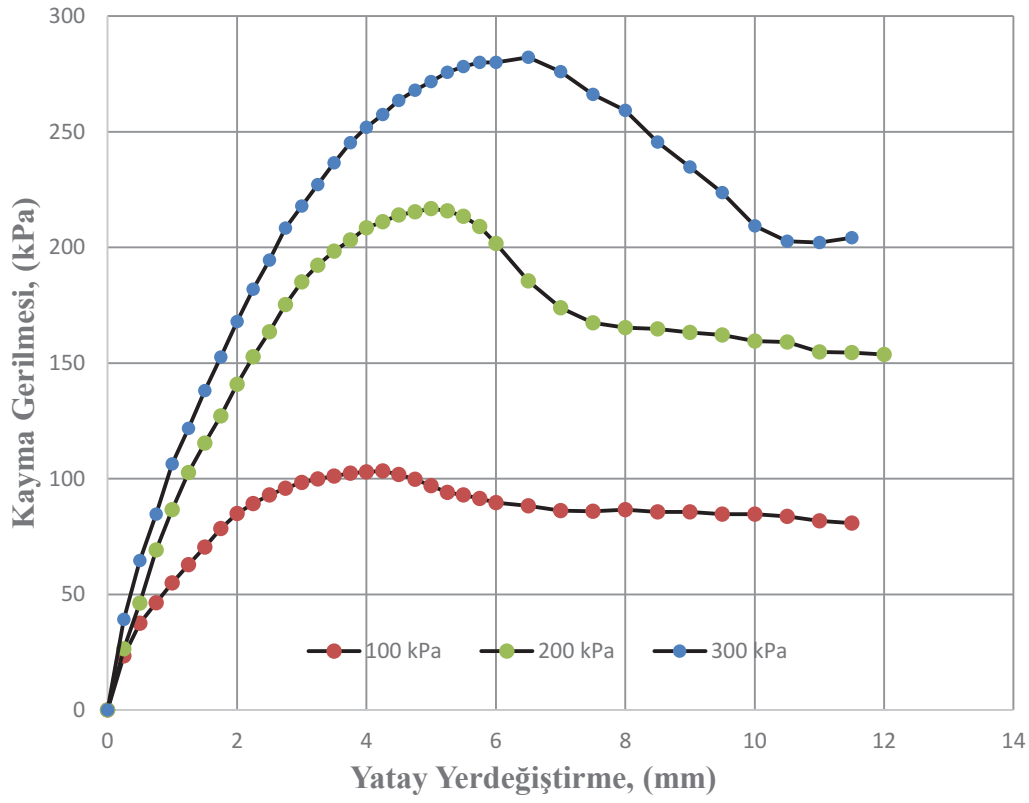
Şekil 4.25 : %60 sıklıkta katkısız numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.



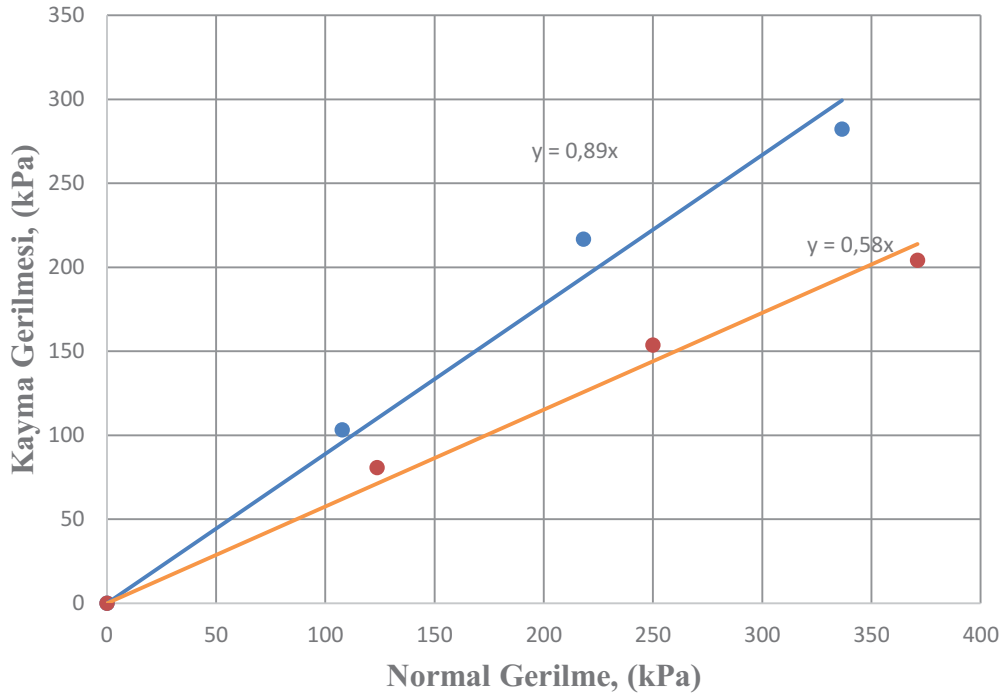
şekil 4.26 : %20 sıklıkta ve %0,25 fiber oranına sahip numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.



şekil 4.27 : %20 sıklıkta ve %0,25 fiber oranına sahip numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.



Şekil 4.28 : %20 sıklıkta ve %0,50 fiber oranına sahip numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.

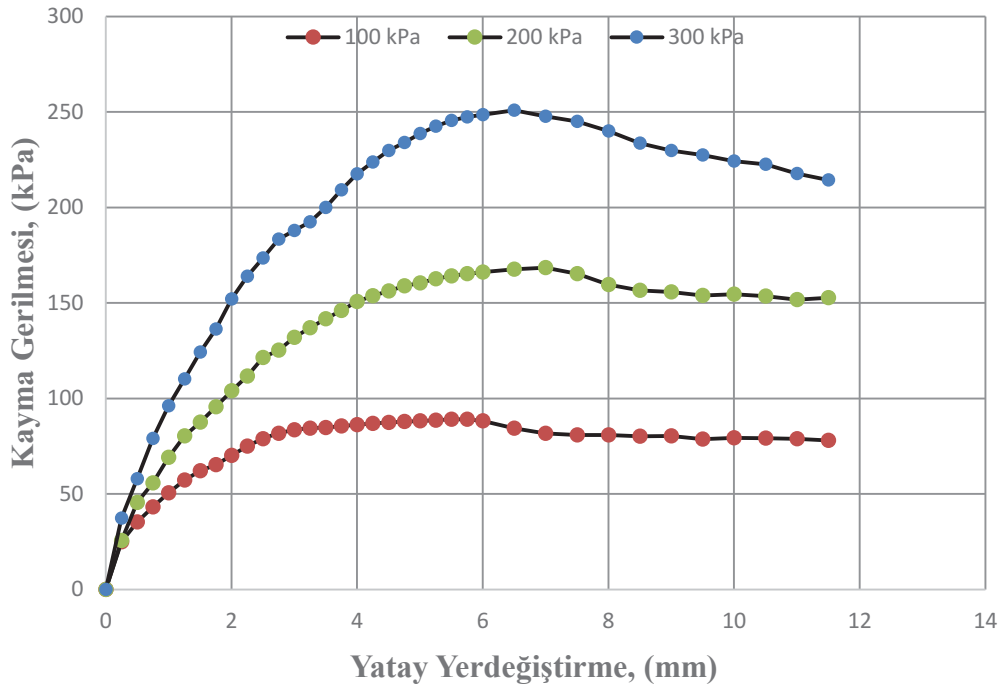


Şekil 4.29 : %20 sıklıkta ve %0,50 fiber oranına sahip numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.

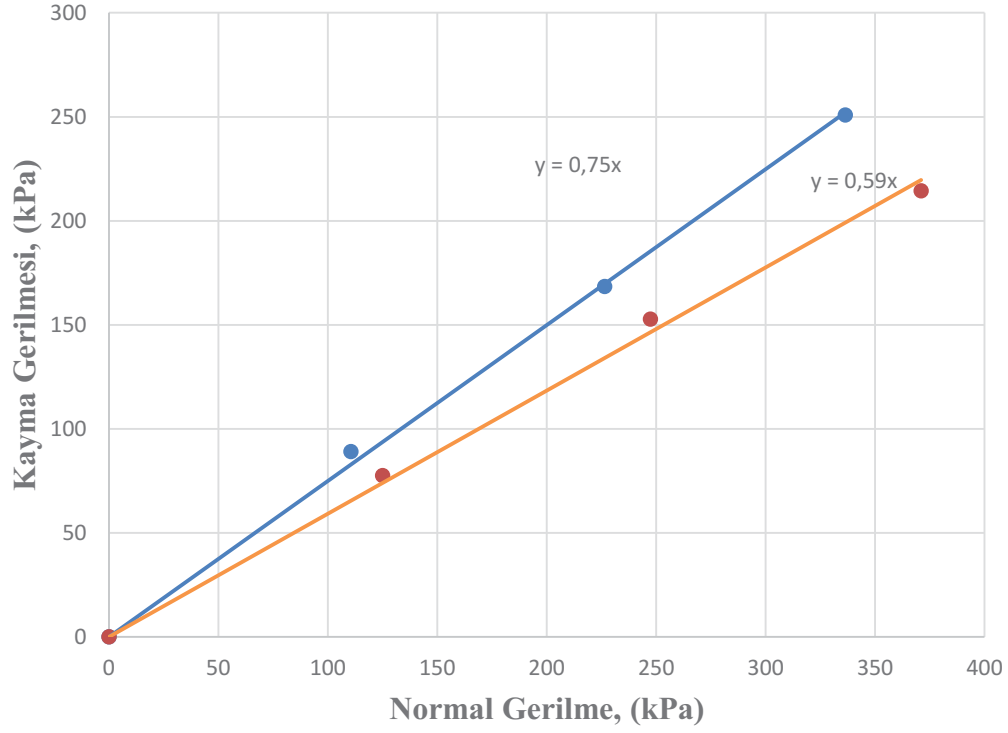
Akpınar kumu ve PP fiber kullanılarak gerçekleştirilen kesme kutusu deney sonuçları ve gerilme – deformasyon grafikleri incelendiğinde, katkısız numunelere ait pik sürtünme açısı değerlerinin gevşek numuneler için 32° , sıkı numuneler için 40° olduğu görülmektedir. Yatay şekil değiştirmelerin artmasıyla beraber, numune dilatasyonu ve buna bağlı olarak normal gerilmenin uniform olmaktan sapması sebebiyle, bu değerlerin ani düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir.

PP fiber katkı kullanılması ile, maksimum kayma gerilmesine erişildikten sonra gözlenen kayma gerilmesi kaybı azalmaktadır. Kırılma sonrası mukavemet kaybının limitlendirilmesi için gerekli optimum fiber oranı, kuru kum ağırlığınca %1,00 olarak belirlenmiştir. Fakat, %0,50 oranında fiber kullanıldığında, gevşek numunelerde daha yüksek pik sürtünme açısı değerlerine erişilmiştir. Bununla birlikte, sıkı numunelerin pik sürtünme açısında, gevşek numunelerin aksine, kayda değer bir değişim görülmemiştir.

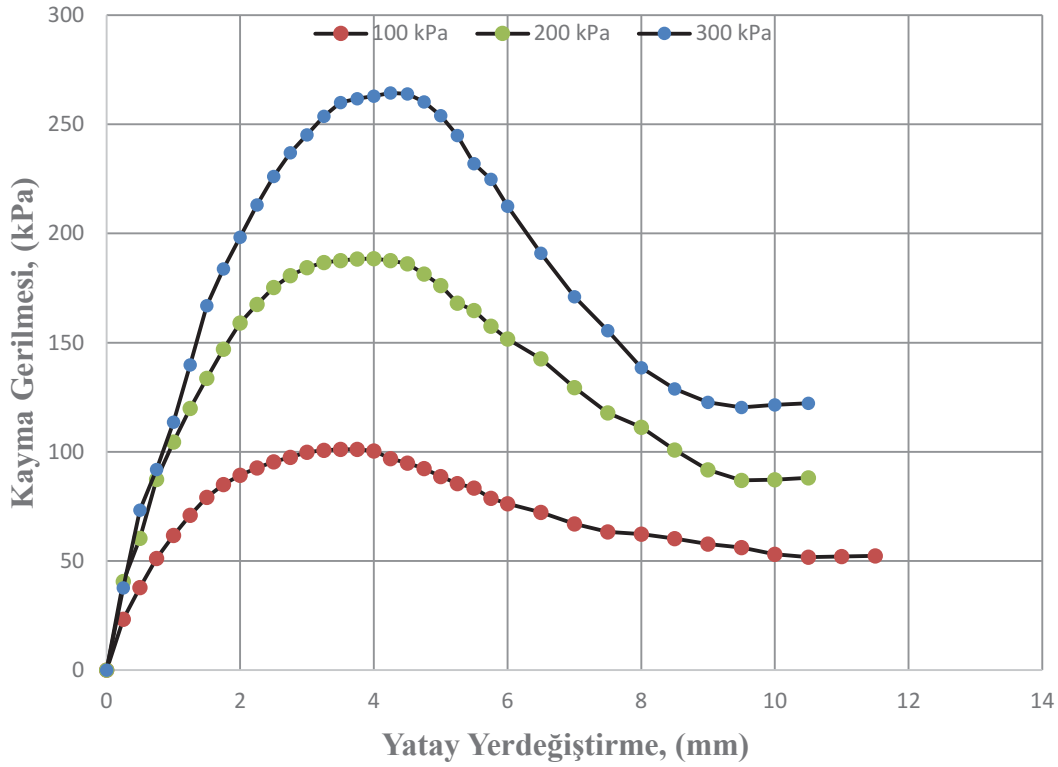
PP fiber liflerinin, kum daneleri içerisinde homojen yayılmasının sağlanması ve toplanmasının önlemesi için, numunelerin yoğun bir şekilde karıştırılması gerekmektedir. Karıştırma işlemi sonrasında, cam fiberin aksine, PP fiber ile kum daneleri arasında bir matris oluşmakta ve malzemelerin birlikte çalışması kolaylaşmaktadır.



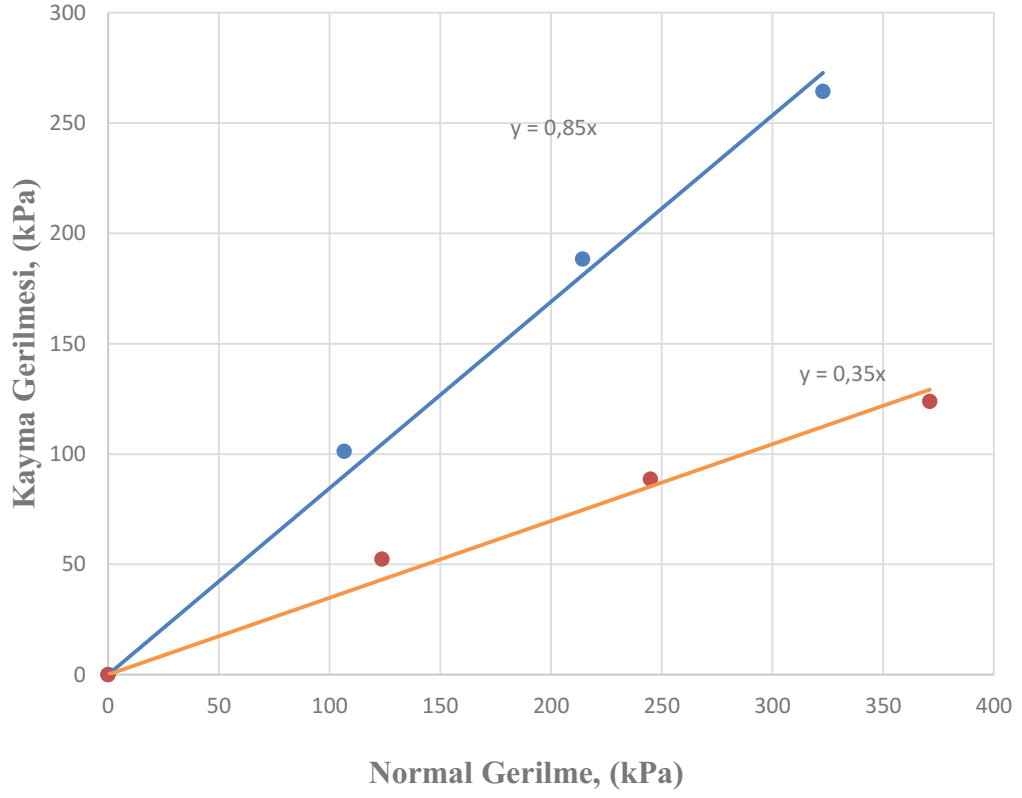
Şekil 4.30 : %20 sıklıkta ve %1,0 fiber oranına sahip numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.



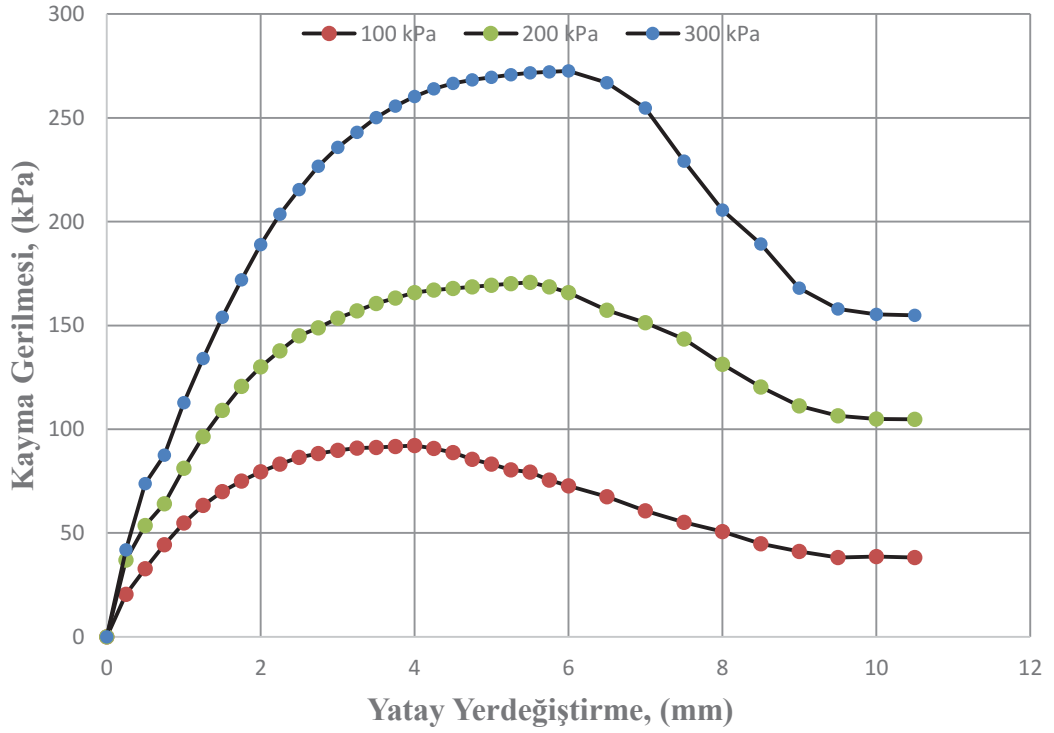
Şekil 4.31 : %20 sıklıkta ve %1,0 fiber oranına sahip numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.



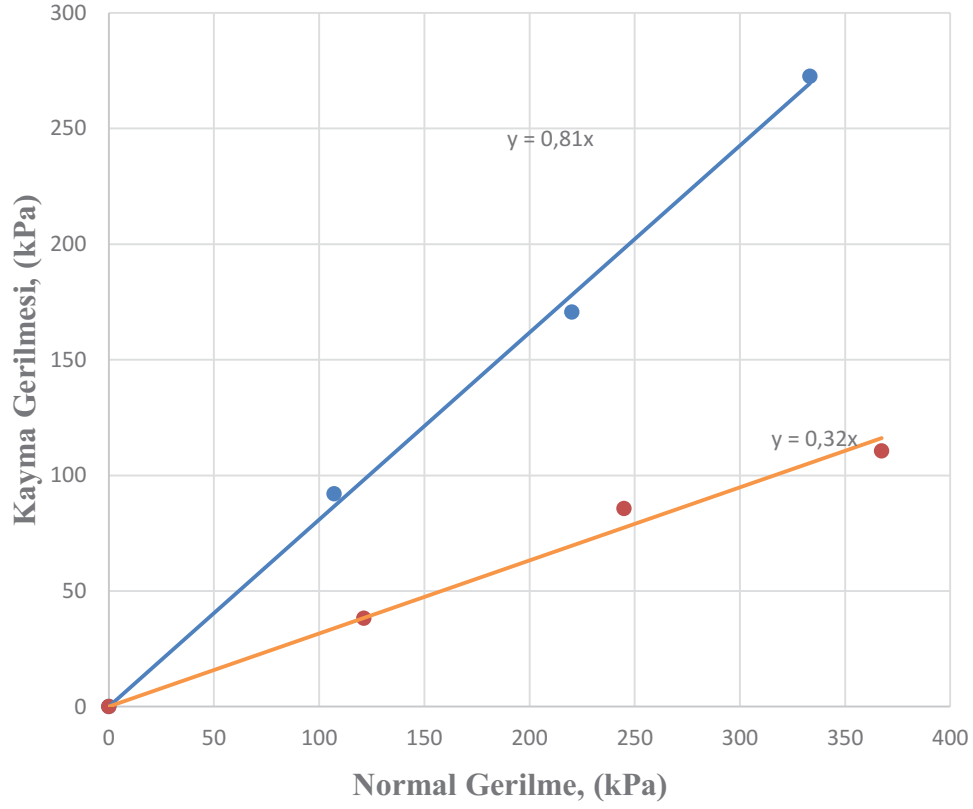
Şekil 4.32 : %60 sıklıkta ve %0,25 fiber oranına sahip numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.



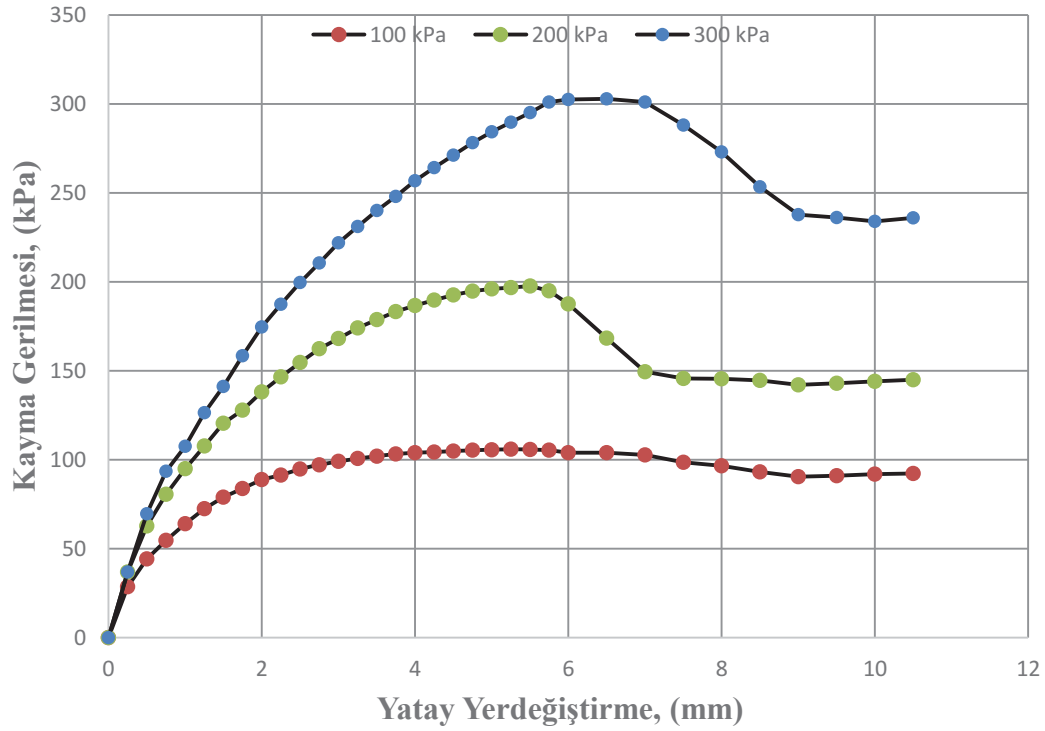
Şekil 4.33 : %60 sıklıkta ve %0,25 fiber oranına sahip numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.



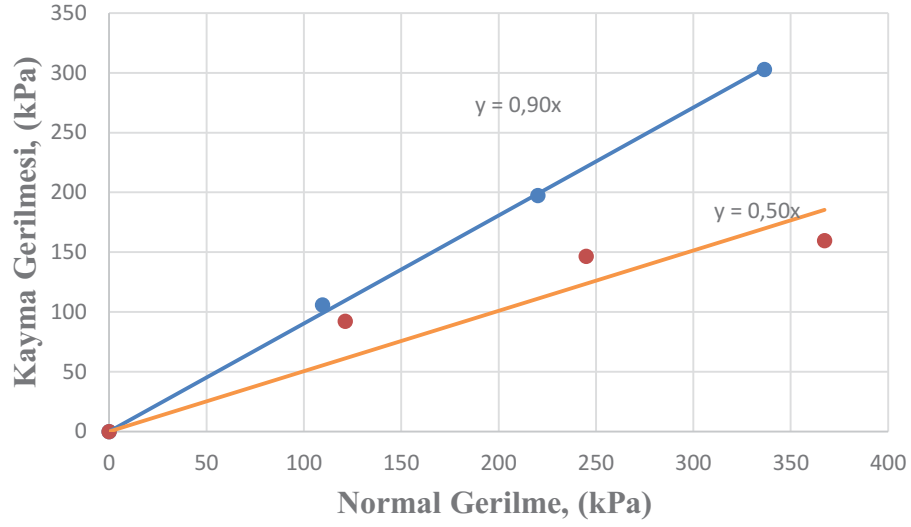
Şekil 4.34 : %60 sıklıkta ve %0,50 fiber oranına sahip numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.



Şekil 4.35 : %60 sıklıkta ve %0,50 fiber oranına sahip numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.



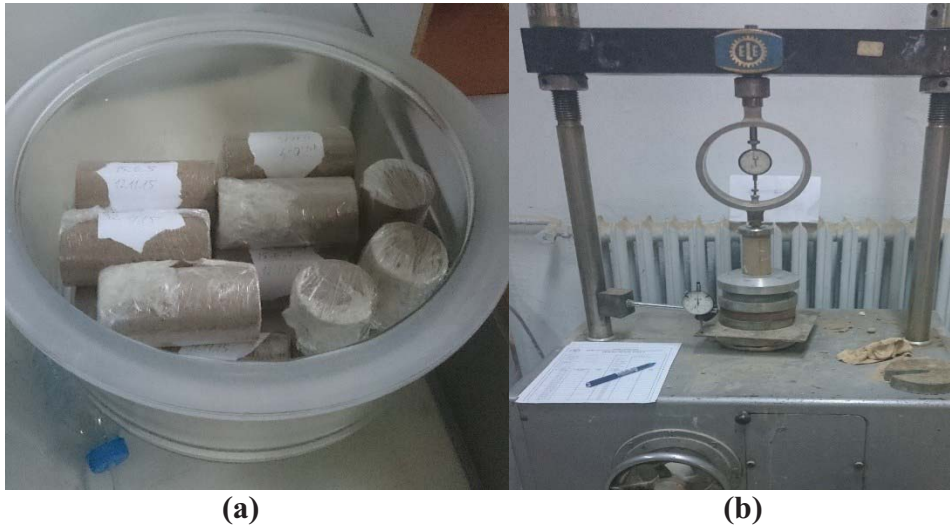
Şekil 4.36 : %60 sıklıkta ve %1,0 fiber oranına sahip numunelerin gerilme şekil değiştirme grafikleri.



Şekil 4.37 : %60 sıklıkta ve %1,0 fiber oranına sahip numunelerin pik ve kırılma sonrası kırılma zarfları.

4.2.2 Serbest basınç deneyleri

Çalışmanın ikinci bölümünde, kesme kutusundan alınan sonuçlar neticesinde, kuru kum ağırlığınca %5, 10 ve 15 oranlarında çimentolu numuneler hazırlanmıştır. Numunelere yine kuru kum ağırlığınca %0,5 ve 1,0 oranlarında fiber katılmıştır. Çimento katkılı karışımlar, dökümün ardından, bir gün süre ile kalıpta bekletilmiş ve sonrasında kalıptan çıkarılarak hidrasyonun devam etmesi için nemlendirilmiş ve nem kaybını önlemek için desikatörde 7 ve 28 gün sürelerde bekletilmiştir. (Şekil 4.38a). Bu süre zarfı sonunda, dışarıya çıkarılmış ve yarım gün süreden sonra serbest basınç deneyi yapılmıştır. (Şekil 4.38b).



Şekil 4.38 : Numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra: (a) Deney öncesi desikatörlerde bekletilmesi. (b) Serbest basınç düzeneğinde kırılması.

Çimento ve fiber katkılı numuneler kalıplara döküldükten sonra, kullanılan çimentonun prize başlama süresinin yaklaşık üç saat olmasına rağmen, en az bir gün süre ile kalıpta bekletilmiştir. Daha kısa bir sürede kalıptan çıkarılmaya çalışıldığında, numunelerin kalıp birleşim noktalarından geçen düzlemden kırıldıkları görülmüştür (Şekil 4.39). Numunelerin karışım oranları Çizelge 4.6’da görüldüğü gibidir.



Şekil 4.39 : Kalıp çıkarma süresinin kısa tutulması durumunda numunenin kırılması.

Çizelge 4.6 : Serbest basınç deneyi numunelerinin karışım oranları.

Numune No	Çimento/Kum, %	Fiber/Kum, %	Su/Çimento, %
5-0-1	5	0	65
5-0-2	5	0	65
5-0-3	5	0	65
5-0-4	5	0	65
5-0-5	5	0	65
10-0-1	10	0	65
10-0-2	10	0	65
10-0-3	10	0	65
10-0-4	10	0	65
10-0-5	10	0	65
15-0-1	15	0	65
15-0-2	15	0	65
15-0-3	15	0	65
15-0-4	15	0	65
15-0-5	15	0	65
5-5-1	5	0,5	65
5-5-2	5	0,5	65
5-5-3	5	0,5	65
5-5-4	5	0,5	65

Çizelge 4.6 (devam): Serbest basınç deneyi numunelerinin karışım oranları.

Numune No	Çimento/Kum, %	Fiber/Kum, %	Su/Çimento, %
5-5-5	5	0,5	65
5-10-1	5	1	65
5-10-2	5	1	65
5-10-3	5	1	65
5-10-4	5	1	65
5-10-5	5	1	65
10-5-1	10	0,5	65
10-5-2	10	0,5	65
10-5-3	10	0,5	65
10-5-4	10	0,5	65
10-5-5	10	0,5	65
10-10-1	10	1	65
10-10-2	10	1	65
10-10-3	10	1	65
10-10-4	10	1	65
10-10-5	10	1	65
15-5-1	15	0,5	65
15-5-2	15	0,5	65
15-5-3	15	0,5	65
15-5-4	15	0,5	65
15-5-5	15	0,5	65
15-10-1	15	1	65
15-10-2	15	1	65
15-10-3	15	1	65
15-10-4	15	1	65
15-10-5	15	1	65

Deneyler sırasında Akpınar kumu ve PP tipindeki fiber malzemesi kullanılmıştır. Öncelikli olarak 10 cm çapında ve 20 cm uzunlupunda, plastik pimaş borulardan kesilen kalıplar kullanılmıştır. Fakat, hacmin büyük olması sebebiyle, homojen ve rastgele fiber dağılımına sahip numunelerin hazırlanmasında güçlükler ve numunelerin kalıptan çıkarılması esnasında zorluklar yaşanmıştır. Bu hususlardan ötürü, 5 cm çapında ve 10 cm boyunda metal kalıplar kullanılarak deneylere devam edilmiştir. Şekil 4.38’de kullanılan kalıp tipleri gösterilmektedir. Kullanılan metal kalıplar “split-spoon” tipinde, düşeyde iki parçaya ayrılabilen niteliktedir.

Numunelerin hazırlanması sırasında; kum, çimento ve su 5 lt kapasiteli bir kapta 300 Watt gücündeki ev tipi mikserde 30-40 dk kadar karıştırılmıştır. Malzemeler miksere

3 kademede eklenmiştir ve her kademe sırasında, karışım mikser dışında el ile de yoğrulmuştur. Fiber lifleri, ayrışmanın önüne geçilebilmesi için sonradan eklenmiştir.

Karışım 5x10 cm'lik kalıplara 3 kademede dökülmüştür. Her kademe sonrasında, karışım eşit miktarda enerji kullanılarak (25 vuruş) sıkıştırılmıştır. Fiber katkılı numunelerde, sıkıştırmaya ek olarak, fiberlerin topaklanmasına karşı şişlenmiştir.

Serbest basınç deneyi sırasında, düzenekte bulunan 0,1366 ve 0,4793 kg/div yay faktörüne sahip kuvvet halkaları yetersiz kalmış ve bunlardan sonra gelen 4,7607 kg/div'lik kuvvet halkası kullanılmıştır. Deney düzeneğinde hücre bulunmamasından ötürü, düşey şekil değiştirme hareket yönü yukarıya doğru iken, numunenin altından alınmaktadır. Fakat bu durum, mikrometreden okunan değerlerin içerisinde, numune kısılmasının yanında kuvvet halkasının düşey sıkışmasını da içermesine neden olmaktadır. Bu sebepten ötürü, okunan toplam düşey yer değiştirme değerleri, kuvvet halkasından alınan değerlerin saat faktörüyle (1/500) çarpılarak çıkarılmasıyla düzeltilmiştir.

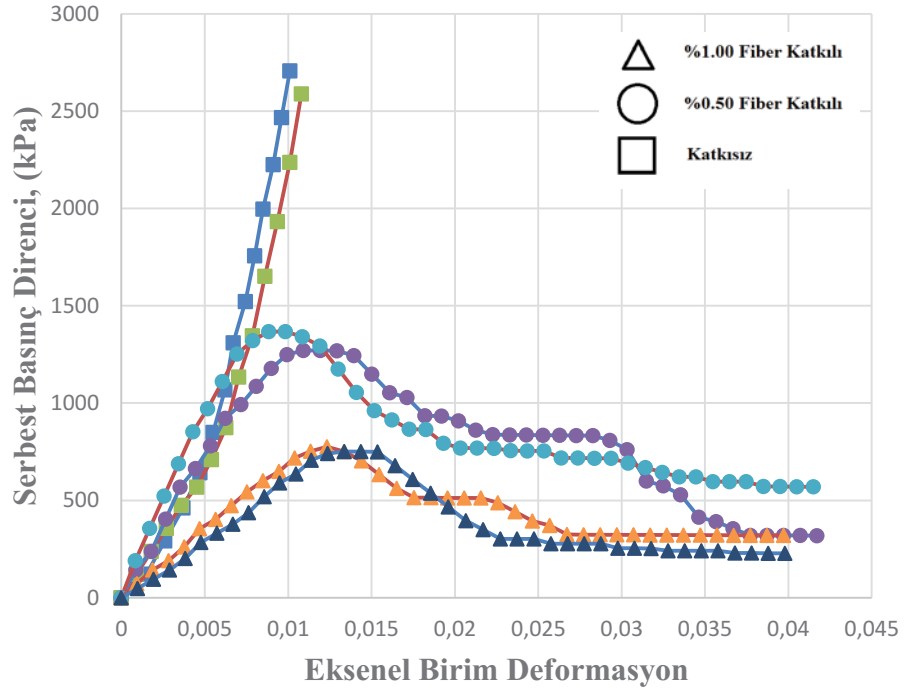
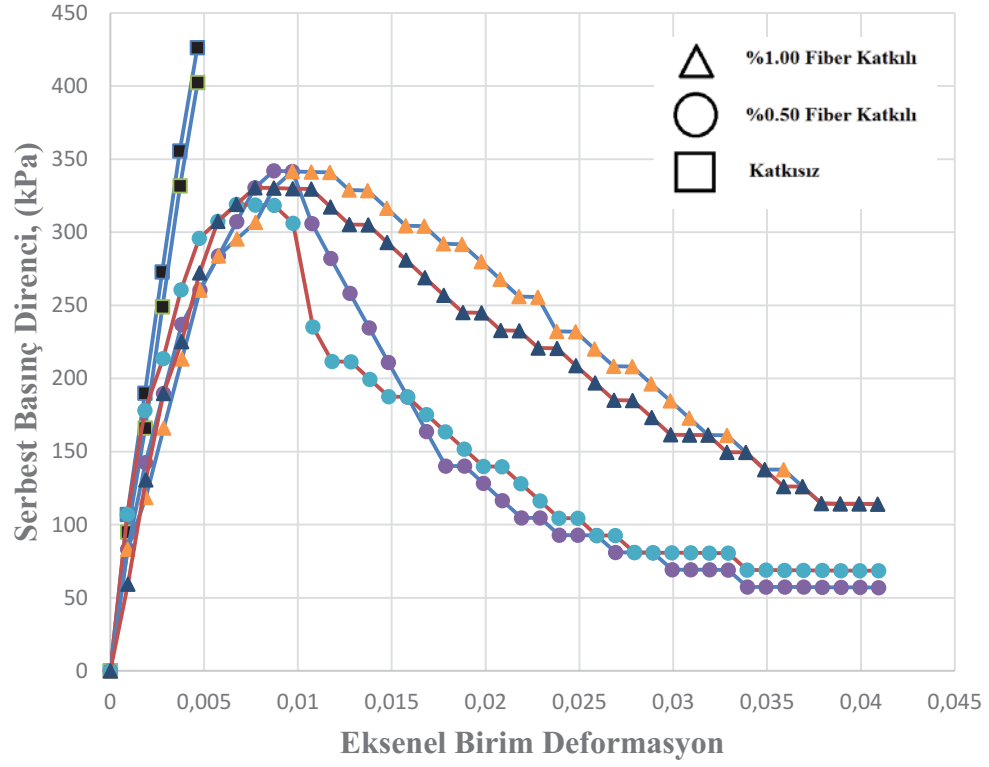
Erken yaş dayanımının incelenebilmesi için, kalıptan çıkarıldıktan 7 gün sonra kırılan numunelere ait serbest basınç dayanımı – eksenel deformasyon çiftini içeren grafikler Şekil 4.41 – Şekil 4.43'de gösterilmektedir. Grafiklerde görüldüğü üzere, çimento yüzdesi arttıkça, numunelerin dayanımı da artmaktadır. Fiber kullanımı ise, serbest basınç dayanımını düşürmektedir. Bunun yanında, yalnız çimentolu numunelerin gevrek olan davranışını sünekleştirmekte ve malzemenin şekil değiştirme özelliklerini geliştirmektedir. Erken yaş dayanımının mukavemet özelliklerinin belirlenebilmesi için her oran için iki adet numunen kırımı gerçekleştirilmiştir.

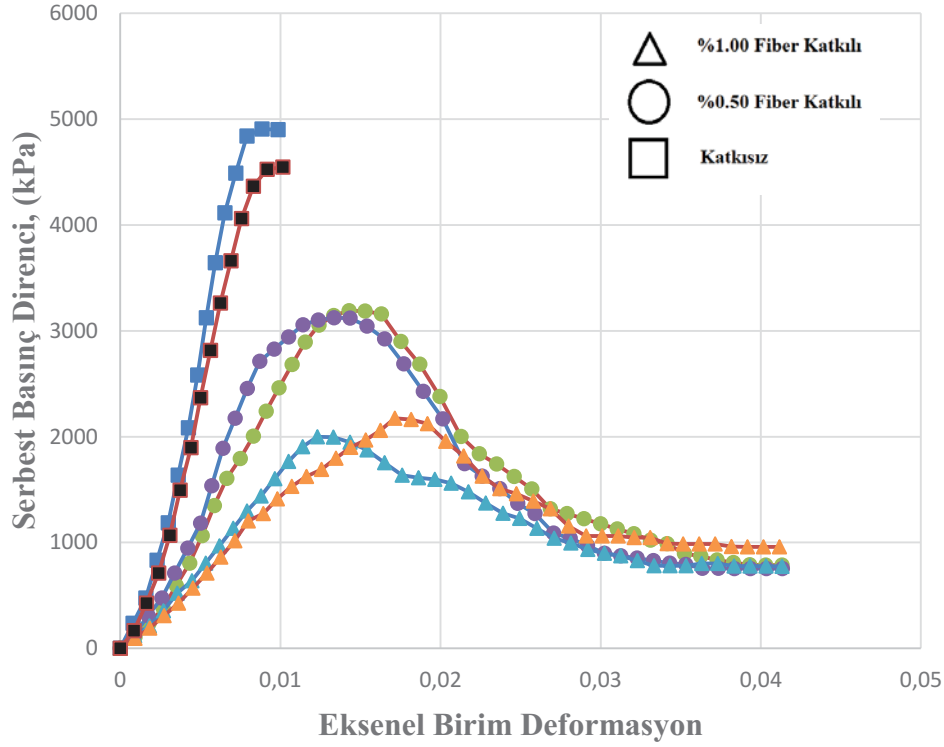


(a)

(b)

Şekil 4.40 : Çalışmalar sırasında kullanılan numune ile dolu kalıplar: (a) 10x20 cm boyutlarında. (b) 5x10 cm boyutlarında.





Şekil 4.43 : Kuru kum ağırlığınca %15,0 çimento oranına sahip farklı fiber katkı oranlarına sahip numunelerin 7 günlük serbest basınç direnci grafikleri.

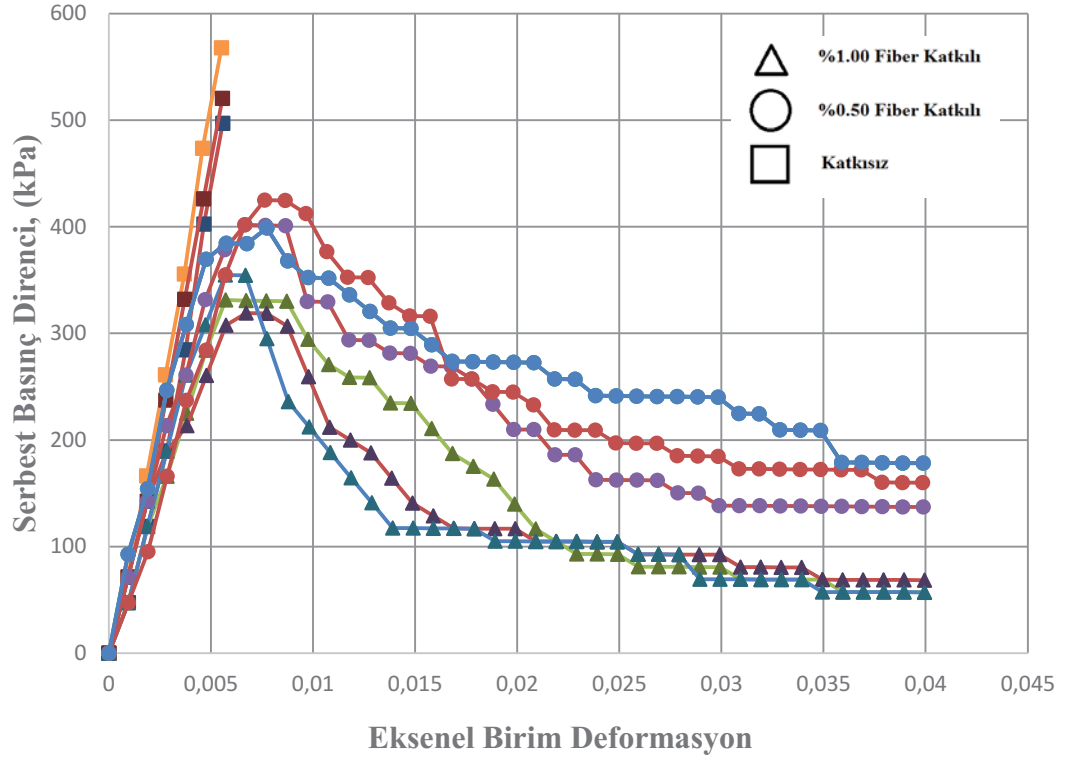
28 günlük dayanımların belirlenmesi için, her karışım oranını temsil eden üç numunenin kırılma işlemi gerçekleştirilmiştir. 28 günlük dayanım özellikleri, 7 günlük numunelere benzerlik göstermektedir.

Numuneler ilişkin serbest basınç dayanımı – eksenel deformasyon çiftini içeren grafikler Şekil 4.44 – Şekil 4.46’da gösterilmektedir.

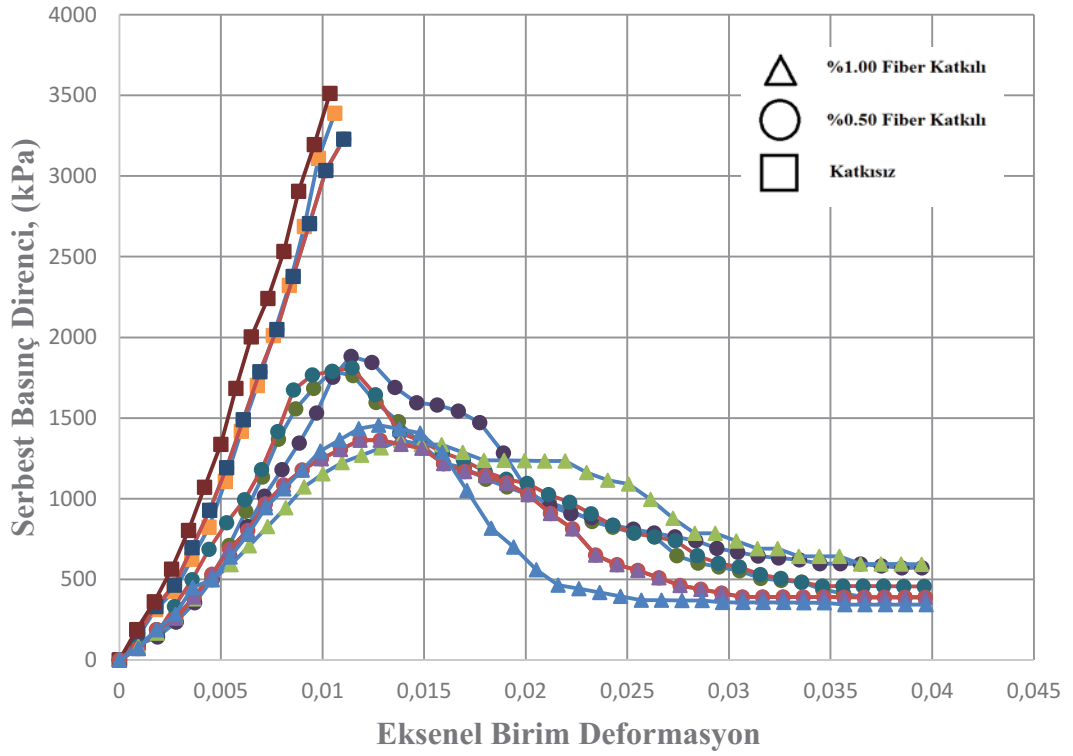
28 günün sonunda, beklenildiği gibi dayanım artmakla birlikte, kırılma davranışının da gevrekleştiği görülmektedir.

Fiber numunelerinin kırılma şekline bakıldığında, kırılmanın tek bir düzlemde olmadığı ve lokal çatlaklar şeklinde olduğu görülmüştür. Fiberin yırtılma dayanımının yüksek oluşu sebebiyle, oluşan çatlaklar arasında, fiber lifleri bütünlüklerini korumuş ve birbirinden ayrılmaya çalışan parçaları desteklemeye devam etmektedirler. Bu da, pik serbest basınç dayanımı aşıldığında, malzeminin yük taşımaya devam edebilmesine olanak sağlamaktadır.

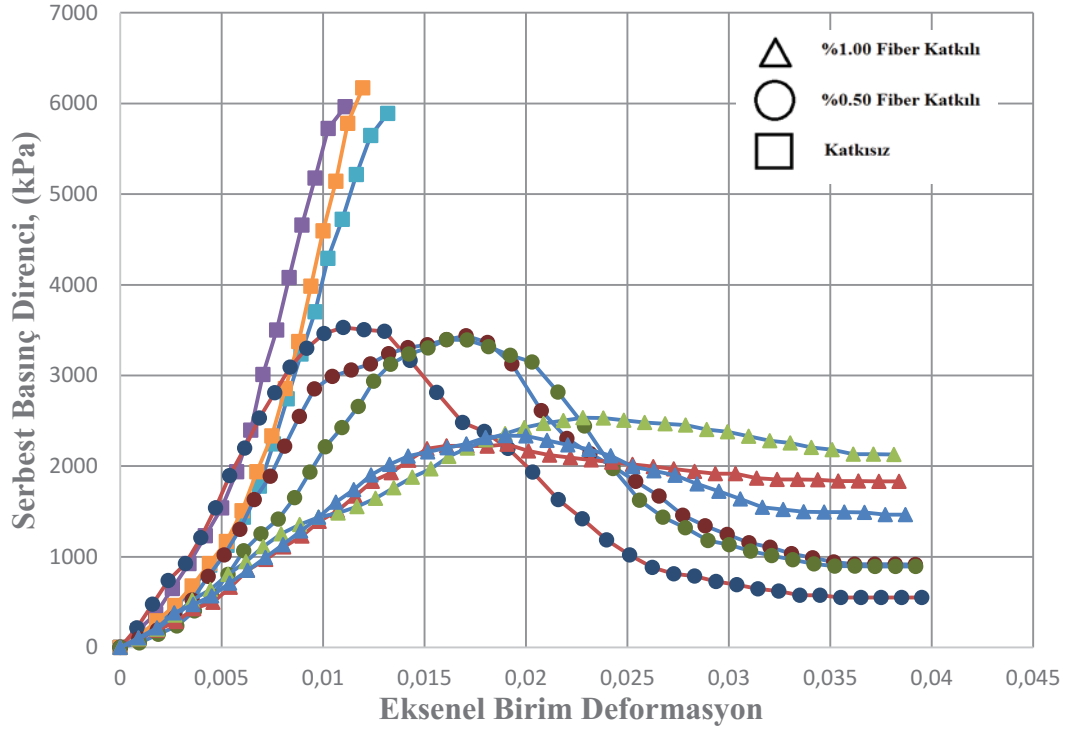
Şekil 4.47’de fiber katkılı numunelerin deney sonrası kırılma mekanizmalarını gösteren görsellere yer verilmiştir.



Şekil 4.44 : Kuru kum ağırlığınca %5,0 çimento oranına sahip farklı fiber katkı oranlarına sahip numunelerin 28 günlük serbest basınç dayanımı grafikleri.



Şekil 4.45 : Kuru kum ağırlığınca %10,0 çimento oranına sahip farklı fiber katkı oranlarına sahip numunelerin 28 günlük serbest basınç dayanımı grafikleri.



Şekil 4.46 : Kuru kum ağırlığınca %15,0 çimento oranına sahip farklı fiber katkı oranlarına sahip numunelerin 28 günlük serbest basınç dayanımı grafikleri.



Şekil 4.47 : Fiberli numunelerin kırılma mekanizmasına örnekler.

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Yapılan deneyler çalışmalarda bir zemin iyileştirme yöntemi olarak fiber katkılı zeminlerin mukavemet parametrelerindeki gelişim ve kayma gerilmesi altındaki davranışının değişimi incelenmiştir.

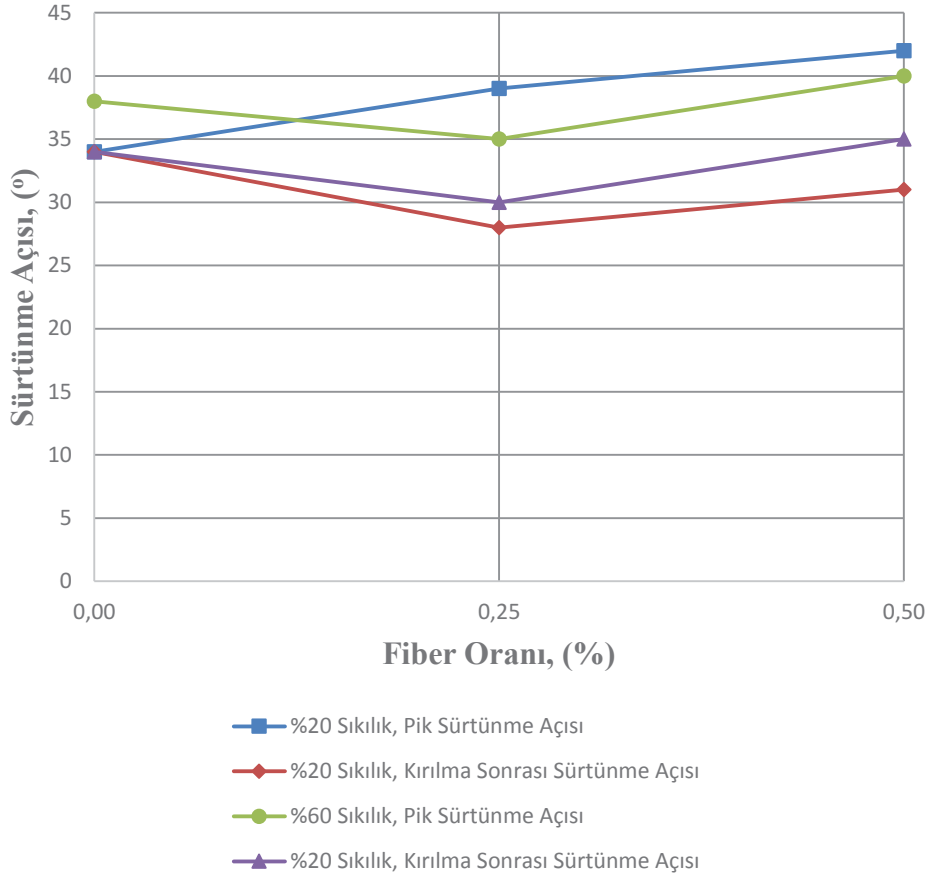
Deneyler kapsamında iki farklı türde kum ve fiber tipi denenmiştir. Kullanılan fiber oranı kumun kuru ağırlığınca hesaplanmıştır ve %0 - 1.0 arasında değişmektedir. Fiber ile kum daneleri arasında aderansın sağlanması amacıyla bir yapı malzemesi olan CEM II tipi Protland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimento miktarı kumun kuru ağırlığınca %5 – 15 arasındadır.

Yalnızca kum ve fiberden oluşan karışımlar üzerinde kesme kutusu deneyleri uygulanmıştır. Numuneler gevşek ve sıkı durumları temsil etmesi bakımından %20 ve 60 sıklıkta hazırlanmıştır. Çimento, fiber ve kum malzemelerinin kullanıldığı numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır.

Deneylerin ilk bölümünde, beyaz renkli ince silika kum ve cam fiber üzerinde çalışılmıştır. Fakat, malzemelerin birlikte çalışmaması, mukavemet parametrelerindeki gelişimin nitelikli olmaması ve cam fiberin göreceli olarak pahalılığı nedeniyle Akpınar kumu ve PP fiber kullanılarak çalışmalara devam edilmiştir.

Silika kum ve cam fiber kullanılarak gerçekleştirilen deneylerinden elde edilen içsel sürtünme açıları değerleri Çizelge 5.1’de gösterilmektedir. Fiber katkı %60 sıklıktaki karışımlar dışında pik içsel sürtünme açısını yükselterek kayma mukavemetini arttırmıştır. Kayma mukavemetindeki bu gelişimin düşük sıklıktaki gevşek zemin numunelerinde daha belirgin olduğu görülmüştür.

Sıkı numunelerdeki pik sürtünme açısındaki artış %0.50 fiber kullanıldığında ortaya çıkmaktadır. Kırılma sonrası sürtünme açılarına bakıldığında ise, katkılı numunelerde bir düşüş gözükmemektedir. Pik sürtünme açısındaki duruma benzer şekilde, kırılma sonrası sürtünme açısı ancak sıkı numunelerde, %0.50 fiber katkı kullanıldığında gözlemlenmektedir. Silika kum ve cam fiber numunelerine katkı oranına göre değişen pik ve sürtünme açısı değişiklikleri Şekil 5.1’de görülmektedir.



Şekil 5.1 : Çeşitli cam fiber katkı oranlarının silika kumun sürtünme açısına etkisi.

Çizelge 5.1 : Silika kum ve cam fiber kullanılan numunelerin içsel sürtünme açısı değerleri.

İçsel Sürtünme Açısı			
Sıklık (%)	Fiber Katkı Oranı (%)	Pik (°)	Kırılma Sonrası (°)
20	0,00	34	34
	0,25	39	28
	0,50	42	31
60	0,00	38	34
	0,25	35	30
	0,50	40	35

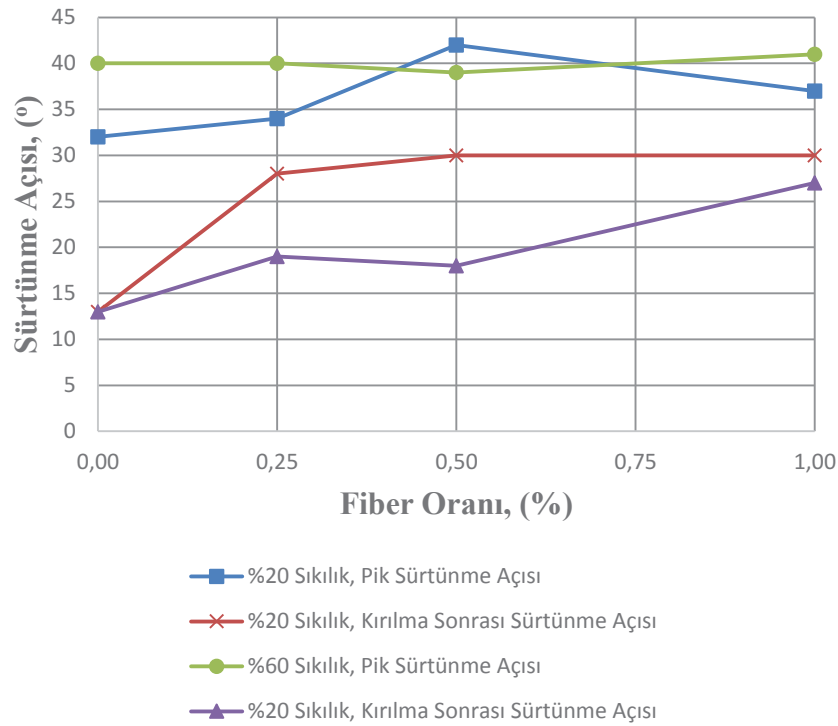
Benzer şekilde, Akpınar kumu ve PP fiber ile gerçekleştirilen kesme kutusu deneyleri neticesinde elde edilen sonuçlar Çizelge 5.2’de özetlenmiştir. Gevşek numuneler için, pik sürtünme açısı tüm fiber oranları için artış göstermektedir. Pik sürtünme açısındaki

en büyük gelişim %0,50 fiber oranı ile sağlanırken, sıkı numunelerin pik içsel sürtünme açısında gözle görülür bir değişiklik olmamaktadır. Kırılma sonrası açığa bakıldığında, fiber katkısı gevşek ve sıkı numuneler için olumlu etki göstermektedir ve %1.00 oranında her iki durum için en büyük değere ulaşılmıştır.

Çizelge 5.2 : Akpınar kumu ve PP fiber kullanılan numunelerin içsel sürtünme açısı değerleri.

İçsel Sürtünme Açısı			
Sıklılık (%)	Fiber Katkı Oranı (%)	Pik (°)	Kırılma Sonrası (°)
20	0,00	32	13
	0,25	34	28
	0,50	42	30
	1,00	37	30
60	0,00	40	13
	0,25	40	19
	0,50	39	18
	1,00	41	27

Akpınar kumu ve PP fiber numunelerine katkı oranına göre değişen pik ve sürtünme açısı değişiklikleri Şekil 5.2’de görülmektedir.



Şekil 5.2 : Çeşitli PP fiber katkı oranlarının Akpınar kumunun sürtünme açısına etkisi.

Çizelge 5.3’de kalıptan çıkarıldıktan 7 gün sonra kırılan numunelerine ait serbest basınç dayanımı ve birim hacim ağırlık değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 5.3 : 7 günlük serbest basınç deneyi numunelerine ait özellikler.

Numune No	Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	Ağırlık		Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)
		Kalıptan Çıkarıldıktan Sonra (gr)	Deney Öncesi (gr)	
15-0-2	4546	391	389,72	1,98
15-0-1	4905	389,91	388,45	1,98
15-5-3	3189	376,82	376,49	1,92
15-5-1	3122	388,26	387,76	1,97
15-10-3	1998	383,68	383,14	1,95
15-10-4	2175	391,35	390,81	1,99
10-0-1	2707	353,64	352,27	1,79
10-0-2	2589	353,61	351,82	1,79
10-5-1	1271	353,77	352,52	1,80
10-5-2	1368	352,89	351,16	1,79
10-10-4	776	346,14	345,65	1,76
10-10-3	751	346,53	345,2	1,76
5-0-4	426	338,01	336,38	1,71
5-0-5	403	339,6	338,33	1,72
5-5-4	342	343,2	341,8	1,74
5-5-3	319	346,54	344,84	1,76
5-10-2	342	347,23	345,57	1,76
5-10-4	331	348,69	347,39	1,77

CEM II tipi Portland çimentosu kullanılarak hazırlanan ve fiber ile katkılanırılan numunelerin tek eksenli dayanım deney sonuçlarına bakıldığında, çimentonun zeminin dayanımını önemli ölçüde arttırdığı görülmektedir. Deneylerde çimento oranı %5 – 15 arasında değişmektedir. Bu oran arttıkça, serbest basınç oranında arttığı görülmektedir. Bununla birlikte, %5 oranında çimento içeren kumlu numunelerin, kendini tutmakta zorlandığı ve oldukça kırılğan yapıda olduğu görülmüştür. Çizelge 5.3’de de görüleceği üzere, bu durum dayanım değerlerinin düşük çıkmasına sebep olmaktadır.

Çimento ve fiberin beraber kullanıldığı karışımlarda, dayanımın, yalnız çimento içeren numunelerden daha düşük olduğu görülmektedir. Fakat, fiber maksimum eksenel gerilmede düşüş yaratmakla birlikte, çimento ile gevrek bir hale gelen malzeme davranışını sünekleştirmektedir. Aynı zamanda, sadece çimento kullanılan

numunelerin aksine, fiber içeren numuneler kırılma sonrası da, dayanımlarının bir kısmını korumakta, daha büyük şekil değiştirmelere müsaade etmektedirler. Deney sonunda ise, fiber liflerinin çimento/kum karışımının çatlak bölgeleri arasında bir köprü gibi çalışarak, malzemenin bütünlüğünü korudukları gözlemlenmiştir.

Ek olarak, yalnız çimento bulunan numunelerin erken yaş (7 gün) dayanımının dahi, %10 oranı için ortalama 2648 kPa, %15 oranı için ortalama 4750 kPa, 1.0 Mpa'dan yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, sonradan yapılması gerekebileen olası bir kazı işleminde zorluklar yaşanmasına sebep olabilir. Çizelge 5.4'de 28 günlük serbest basınç deneyine ait numune özelliklerine yer verilmektedir.

Çizelge 5.4 : 28 günlük serbest basınç deneyi numunelerine ait özellikler.

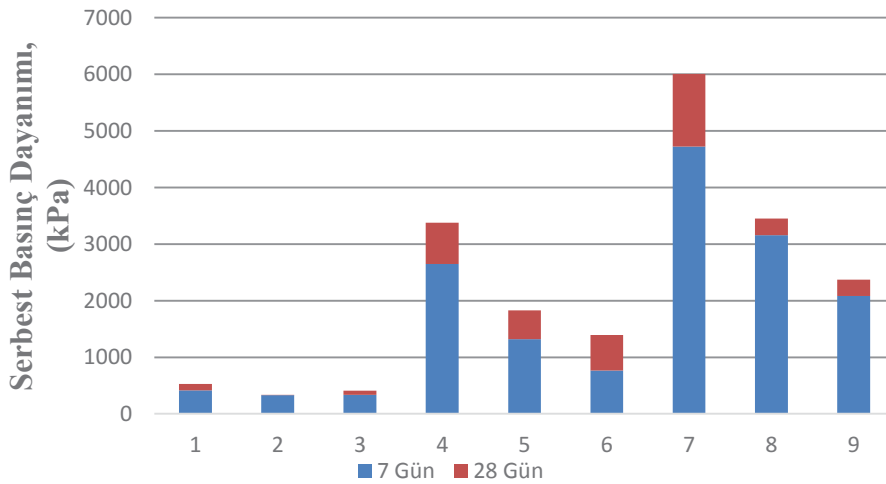
Numune No	Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	Ağırlık		Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)
		Kalıptan Çıkarıldıktan Sonra (gr)	Deney Öncesi (gr)	
15-0-3	5965	380,16	380,03	1,94
15-0-4	5889	379,73	379,48	1,93
15-0-5	6173	375,50	374,28	1,91
15-5-2	3530	390,52	390,33	1,99
15-5-4	3438	387,81	387,56	1,97
15-5-5	3394	382,91	382,71	1,95
15-10-1	2241	396,74	396,01	2,02
15-10-2	2534	400,38	399,56	2,03
15-10-5	2332	394,86	394,57	2,01
10-0-3	3512	353,96	353,20	1,80
10-0-4	3390	356,65	356,00	1,81
10-0-5	3228	356,78	356,73	1,82
10-5-3	1789	354,18	354,18	1,80
10-5-4	1882	355,02	354,67	1,81
10-5-5	1811	359,86	358,58	1,83
10-10-1	1363	353,06	352,80	1,80
10-10-2	1361	353,40	350,29	1,78
10-10-5	1456	350,36	349,10	1,78
5-0-1	568	340,76	339,80	1,73
5-0-2	497	335,90	334,21	1,70
5-0-3	521	339,57	337,98	1,72
5-5-1	319	352,74	351,90	1,79
5-5-2	331	348,00	347,74	1,77
5-5-5	355	345,43	345,10	1,76
5-10-1	402	353,11	352,95	1,80
5-10-3	425	356,80	355,21	1,81
5-10-5	400	351,82	350,39	1,78

7 ve 28 günlük dayanımlar değerlendirildiğinde, fiber katkısı olmayan, yalnızca çimento içeren numunelerin, tüm çimento oranları için, %27-28 arasında arttığı görülmektedir. Fakat, fiber katkılı numunelerdeki zamana bağlı mukavemet artışı daha az olmakla birlikte bu artış belirsizdir. Buna sebep olarak, ağırlığına göre yüzey alanı geniş olan fiber malzemesinin, karışımların hidrotasyon için gerekli su miktarını arttırdığı yönünde düşünülebilir.

Çizelge 5.5’de tüm karışım oranları için 7 ve 28 günlük ortalama dayanım değerleri verilmiştir. Aynı durum Şekil 5.3’de görsel olarak da ifade edilmiştir.

Çizelge 5.5 : Farklı karışım oranları için 7 ve 28 günlük ortalama serbest basınç dayanımı değerleri.

Karışım		Ortalama Serbest Basınç Dayanımı	
		7 Gün (kPa)	28 Gün (kPa)
1	5-0	414	529
2	5-5	330	335
3	5-10	336	409
4	10-0	2648	3377
5	10-5	1319	1827
6	10-10	763	1393
7	15-0	4725	6009
8	15-5	3155	3454
9	15-10	2086	2369



Şekil 5.3 : Çimento ve fiber katkılı numunelerin zamana bağlı dayanım değişimi.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında kum zeminlerde fiber katkı kullanılarak mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesi ve kayma gerilmesi - şekil değiştirme özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi için bir takım fiziksel özellik deneyleri yapılmış ve mukavemet parametrelerindeki değişimlerin belirlenebilmesi için kesme kutusu ve tek eksenli basınç deneyleri uygulanmıştır. Fiber ve kum daneleri arasında aderansın sağlanması için çalışmanın ikinci kısmında çimento kullanılmıştır. Çimentolu deneylere geçilmeden önce, iki farklı kum ve fiber tipi denenmiştir.

Cam fiber, gevşek silika kum numunelerine %0.50 oranında katıldığında, 34° olan içsel sürtünme açısını 42°'ye yükseltmiştir. Sıkı numunelerin pik içsel sürtünme açısı ise 38°'den 40° çıkmıştır. Her iki sıklık için 34° olan kırılma sonrası açısı, %0.50 fiber kullanılarak, gevşek ve sıkı numuneler için sırasıyla 31 ve 35°'ye yükselmiştir.

PPF ve Akpınar kumu kullanıldığında gevşek numunelerde pik sürtünme açısı %0.50 fiber kullanıldığında 32°'den 42°'ye yükselmiştir. Sıkı numunelerin pik açısında gözle görülür bir değişim görülmemiştir. Kırılma sonrası açısı gevşek numunelerde %0.50 ve 1.00 fiber oranları için 30°'ye çıkarken sıkı karışımlarda bu değer 27° olmaktadır.

Kumlarda fiber katkı yalnız kullanıldığında, zeminin pik sürtünme açısını arttırabildiği gibi, pik değerden sonraki mukavemet kaybını sınırlamaktadır.

Fiber katkısız kum – çimento karışımlarında, 7 günlük süre sonunda; sırası ile %5, 10 ve 15 oranlarında çimento eklendiğinde, ortalama olarak 414, 2648 ve 4725 kPa'lık dayanım ortaya çıkmaktadır. Çimento katkının %5 olduğu numunelerin kendini tutmakta zorlandığı görülmekte ve bu durum çimento miktarının yetersiz kaldığı şeklinde yorumlanabilmektedir. Çimento ile artan tek eksenli zemin dayanımı, malzeme davranışını oldukça gevrekletirmektedir.

Çimento ile fiber birlikte kullanıldığında, karışım dayanımları düşmekle birlikte, davranış sünekleşmekte ve en büyük eksenel gerilme için daha fazla şekil değişimi

gerekmektedir. Aynı zamanda, pik gerilme ardından numuneler dayanım göstermeye devam etmektedir.

Kalıptan çıkarıldıktan sonra 28 gün nemini kaybetmeden bekletilen numunelerden yalnız çimento katkı içerenlerin dayanımlarında %27-28'lik bir dayanım artışı olmaktadır. Fakat, fiber içeren numunelerin dayanım artışı daha az olmaktadır. Bu durum fiberin yüzey alanı ile artan su ihtiyacının karşılanmasındaki önemini göstermektedir. %10 ve 15 oranında çimento içeren karışımlara %0.5 oranında fiber eklendiğinde dayanım %1.0 fiber içeren numuneler göre daha büyük çıkmaktadır. Fakat, %1.0 fiber oranındaki karışımlar daha sünek davranış göstermektedir. Bu yüzden, fiber oranı seçilirken, mühendislik projelerindeki hedeflere göre gözden geçirilmelidir.

Çimento ve fiber katkılı numunelerin serbest basınç deneyi süresince gösterdikleri kırılma şekillerine bakıldığında, yalnızca çimento içeren karışımların beton numunelerinkine benzer, kesit normaliyle 40-45° açı yapılarak kırıldıkları; fiber içeren numunelerin ise kırılmasının, numune içerisinde birbiri ile bağıntılı daha ince boyutta ve sayıca fazla olan çatlaklar şeklinde olduğu gözlemlenmiştir. Fiber lifleri, bu çatlaklar arasında köprü görevi görerek numunelerin dağılmasını önlemekte ve pik gerilmeden sonrada yük taşımaya devam edebilmesine olanak sağlamaktadırlar.

Tez kapsamında, fiber katkının zeminin mühendislik özellikleri iyileştirebileceği ve kayma gerilmesi – şekil değiştirme davranışını değiştirebileceği edebileceği görülmüştür. Fiber katkının bir iyileştirme yöntemi olarak kullanılması, proje için iyileştirme çıktıları ve diğer iyileştirme yöntemleri ile maliyet analizi yapılması durumunda mümkündür.

KAYNAKLAR

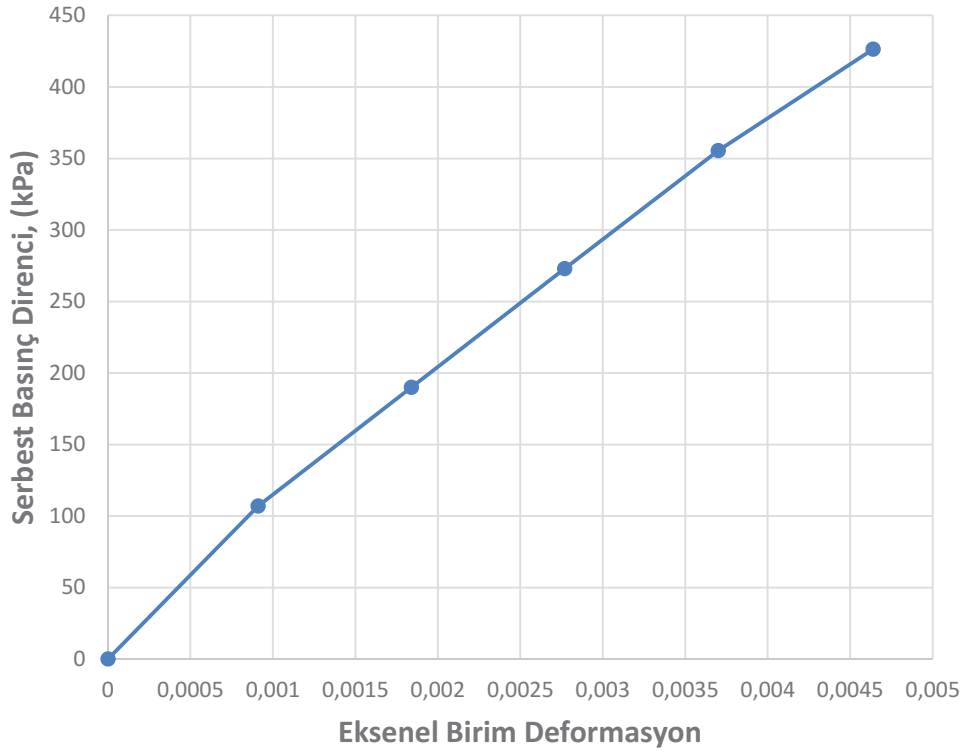
- Al Adili, A., Azzam, R., Spagnoli G., & Schrader, J.** (2012). Strength of Soil Reinforced with Fiber Materials. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Vol. 48, No. 6, January (2012).
- ASTM** (2001). *Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil*, (ASTM D6706-01).
- ASTM** (2011). *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soil Under Consolidated Drained Conditions*, (ASTM D3080/3080M-11).
- ASTM** (2013). *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*, (ASTM D2166/2166M-13).
- ASTM** (2015). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*, (ASTM C128-15).
- Bell, F. G.** (1993). *Engineering Treatment of Soils*. London: E & FN Spoon.
- Bowles, J. E.** (1996). *Foundation Analysis and Design*. Peoria, Illinois.
- Budhu, M.** (2010). *Soil Mechanics and Foundations* (3rd. ed.). ABD: John Wiley & Sons.
- Cerato A. B. & Lutenege, A. J.** (2006). *Specimen size and scale effects of direct shear box tests of sands*. Geotechnical Testing Journal, Vol. 29, No.6, (pp. 1-9).
- Chaple, P., M. & Dhatrak, A., I.** (2013). *Performance of Coir Reinforced Clayey Soil*. The International Journal Of Engineering And Science. Vol. 2, Issue 4, (2013), (pp 54-64).
- Consoli, N. C., Vendruscolo, M. A., Fonini, A. & Rosa, F. D.** (2009). Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range, *Geotextiles and Geomembranes* 27 (2009), (pp. 196-203).
- Çetinkaya, M.** (2012). *Polipropilen Liflerin Uçucu Kül Zemin Karışımlarında Geoteknik Özelliklere Etkisi*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Craig, R.F. & Knappett, J. A.** (2012). *Craig's Soil Mechanics* (8. bs.). NY: Spoon Press.
- Darvishi, A.** (2014). *Fiber ile Güçlendirilmiş Kum Zeminlerin Dinamik Özellikleri ve Statik Davranışları*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Das. B. M.** (2011). *Principles of Foundation Engineering* (8. bs.). ABD: Cengage Learning.

- Gerkuş, H.** (2011). *Fiber ile Güçlendirilmiş Kum Zeminlerin Dinamik Özellikleri ve Statik Davranışları*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- GMA.** (2002). *Handbook of Geosynthetics*. Geosynthetic Materials Association.
- Gray, D. H. & Ohashi, H.** (1983). Mechanics of fiber reinforcement in sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol 109, No 3, (pp. 335-353).
- Hamidi, A. & Hooresfand, M.** (2012). Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand, *Geotextiles and Geomembranes* 36 (2013), (pp.1-9).
- Hejazi. S. M., Sheikhzadeh. M., Abtahi. S. M. & Zadhoush. A.** (2012). A simple review of soil reinforcement by using natural and synthtic fibers. *Construction and Building Materials*, Vol. 30, (2012), (pp. 100-116).
- Impe. W. F. V.** (1989). *Soil Improvement Techniques and Their Evolution*. Hollanda: A.A. Balkema.
- Li, C. & Zornberg, J. G.** (2013). Mobilization of Reinforcement Forces in Fiber-Reinforced Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* (2013), (pp. 107-115).
- Muir, D.M.** (2006). *Geoteknik Modelleme* (K. Kayabalı, Çev.). Ankara: Fersa Matbaacılık.
- Parto, P. & Kalantari, B.** (2012). Influence of Polypropylene Fibers on The Compressive Strength of Windblown Sand-Cement Mortar, *Ejge Vol. 17 [2012], Bund. B*, (pp 225-240).
- Torabi, M.** (2014). *Behavior of Fiber Reinforced Sand Under Static Load*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tuncer, E. Y.** (2012). *Cam Köpüğü-Çimento Karışımının Hafif Dolgu Malzemesi Olarak Geoteknik Özellikleri*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Uzuner, B. A.** (2013). *Temel Mühendisliğine Giriş* (5. bs.). Trabzon: Derya Kitabevi.
- Xanthakos, P. P., Abramson, L. W. & Bruce, D. A.** (1994). *Ground Control and Improvement*. New York: J. Wiley.
- Yetimoğlu, T. & Salbaş, Ö.** (2002). Dağınık liflerle rastgele donatılı kumların kayma mukavemeti. *IMO Teknik Dergi, Yazı 174* (2002), (pp. 2587-2596).
- Url-1** <<http://www.moretrench.com>>, erişim tarihi 10.09.2015.
- Url-2** <<http://www.dimolanka.com>>, erişim tarihi 12.09.2015.
- Url-3** <<http://www.intracorp.ca>>, erişim tarihi 12.09.2015.
- Url-4** <<http://www.menard-web.com>>, erişim tarihi 15.09.2015.
- Url-5** <<http://www.ffgb.be>>, erişim tarihi 15.09.2015.
- Url-6** <<http://www.sunlyengineering.com>>, erişim tarihi 22.10.2015.
- Url-7** <https://en.wikipedia.org/wiki/Mohr%27s_circle>, erişim tarihi 25.10.2015.

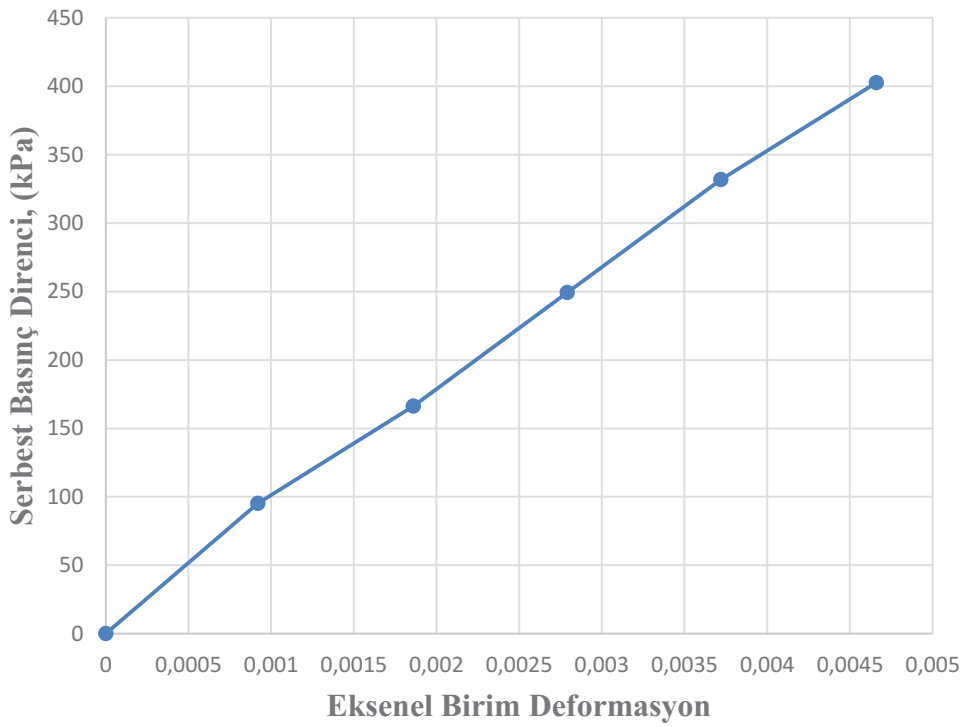
EKLER

- EK A:** Serbest basınç deneyi sonuçları
EK B: Deneyisel çalışmalara ait çeşitli görseller

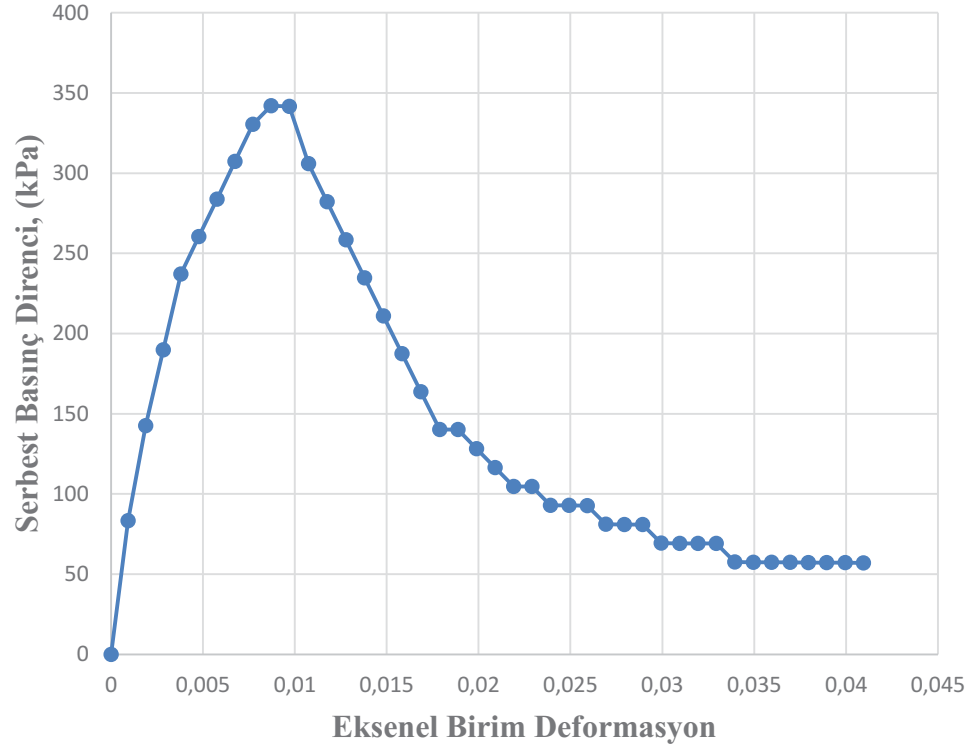
EK A



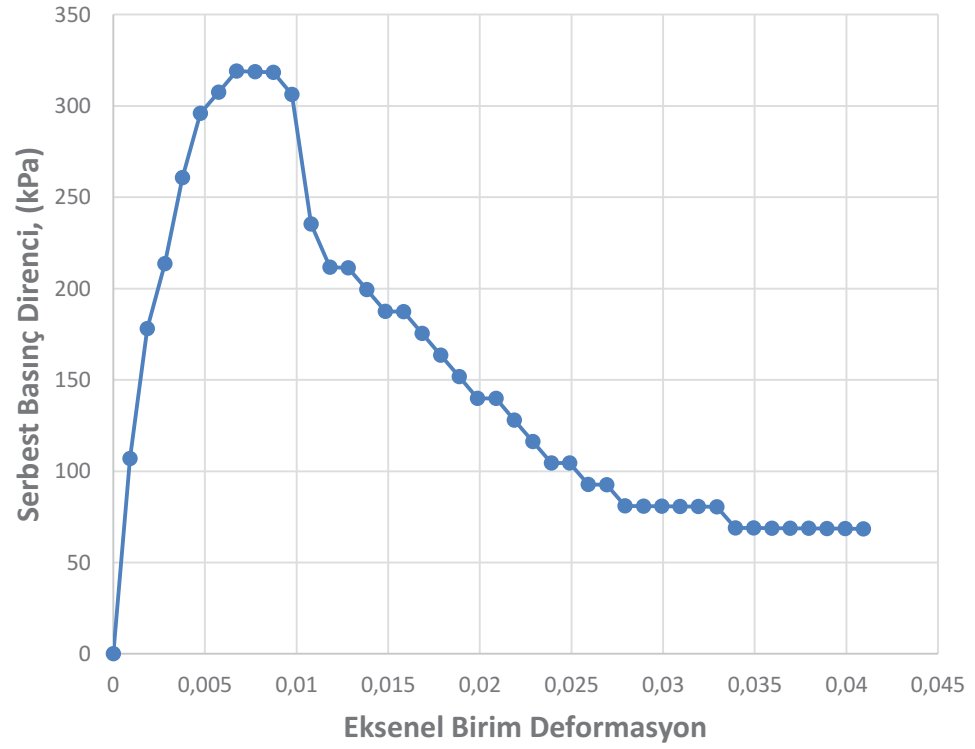
Şekil A.1 : 5-0-4 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



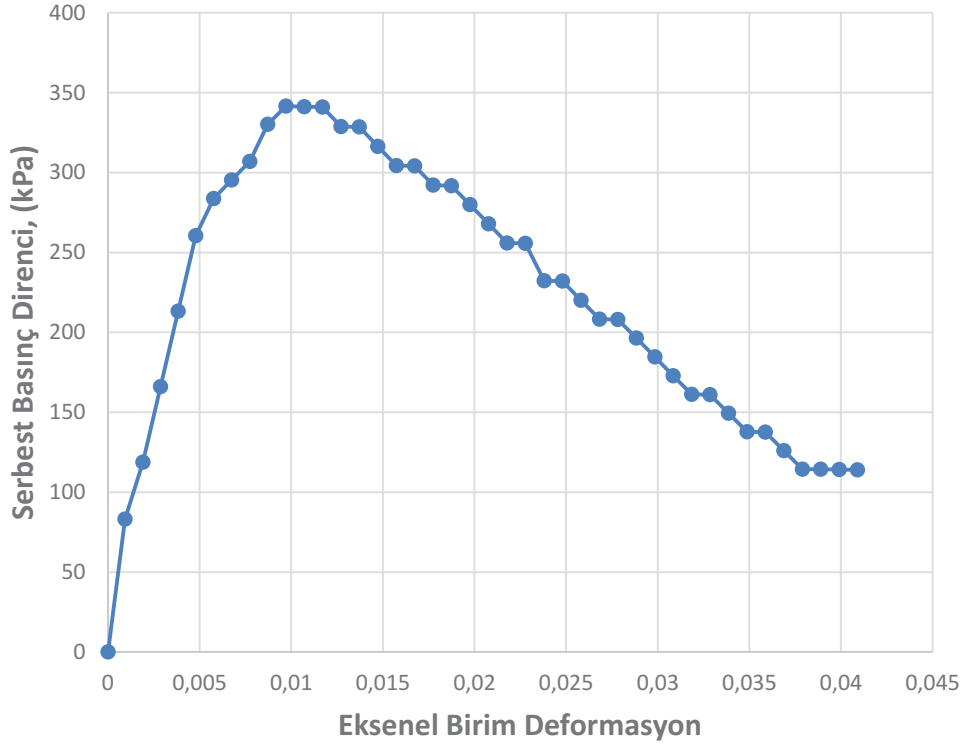
Şekil A.2 : 5-0-5 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



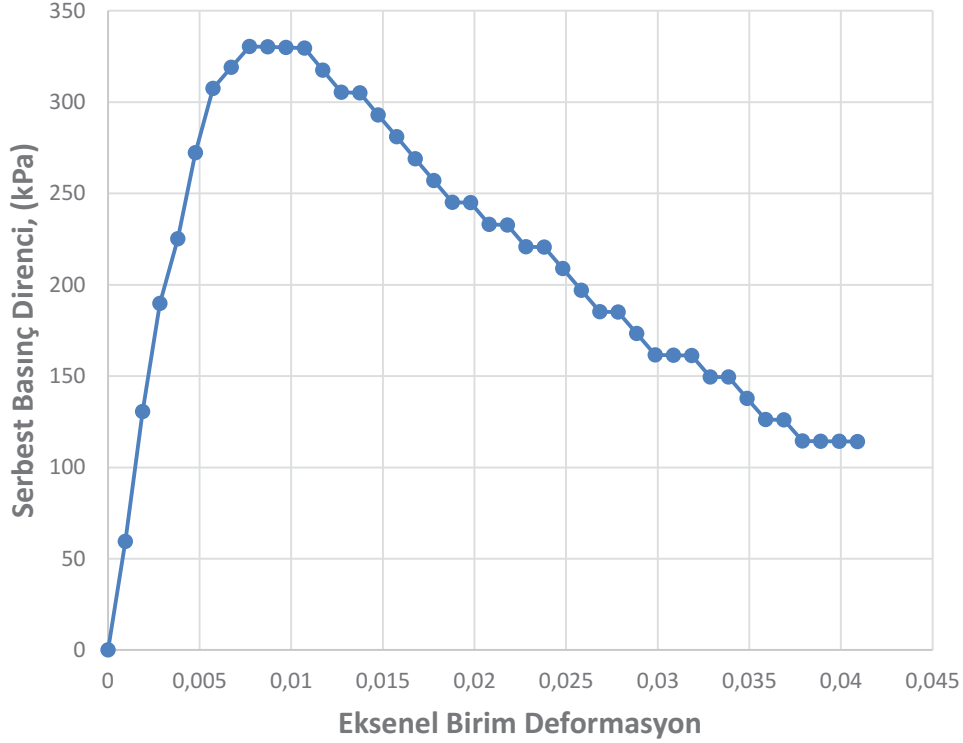
Şekil A.3 : 5-5-4 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



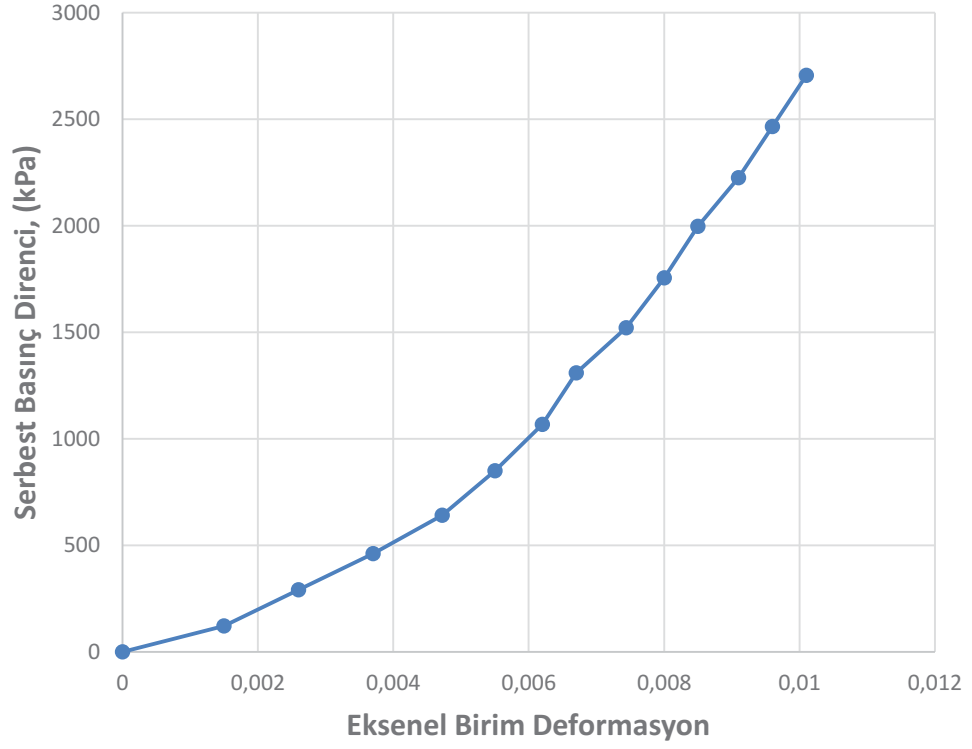
Şekil A.4 : 5-5-3 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



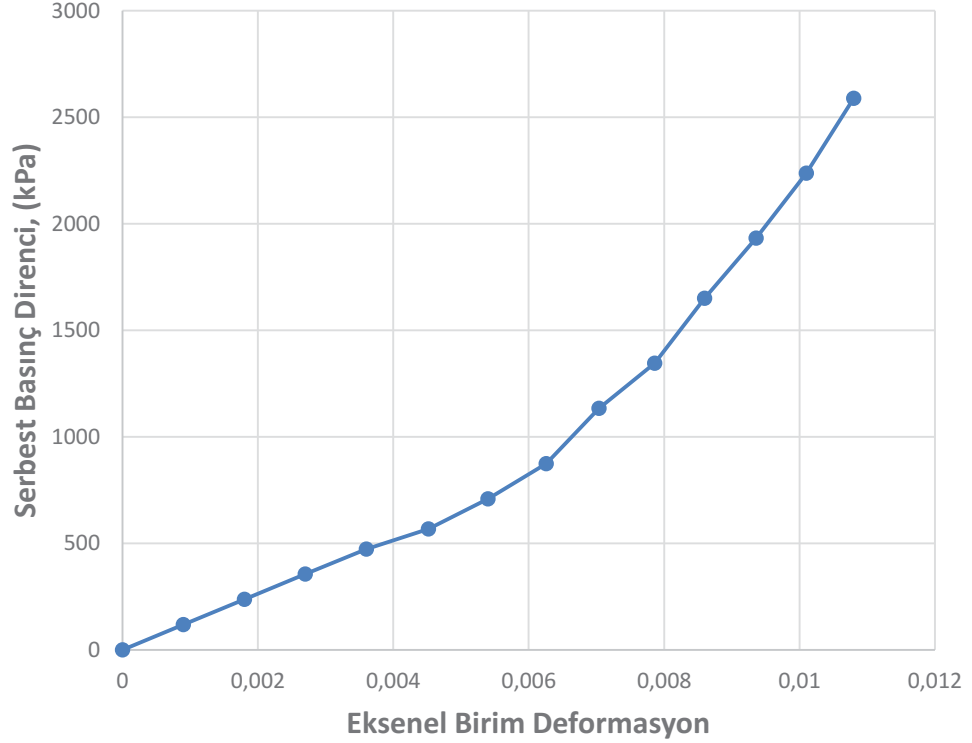
Şekil A.5 : 5-10-2 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



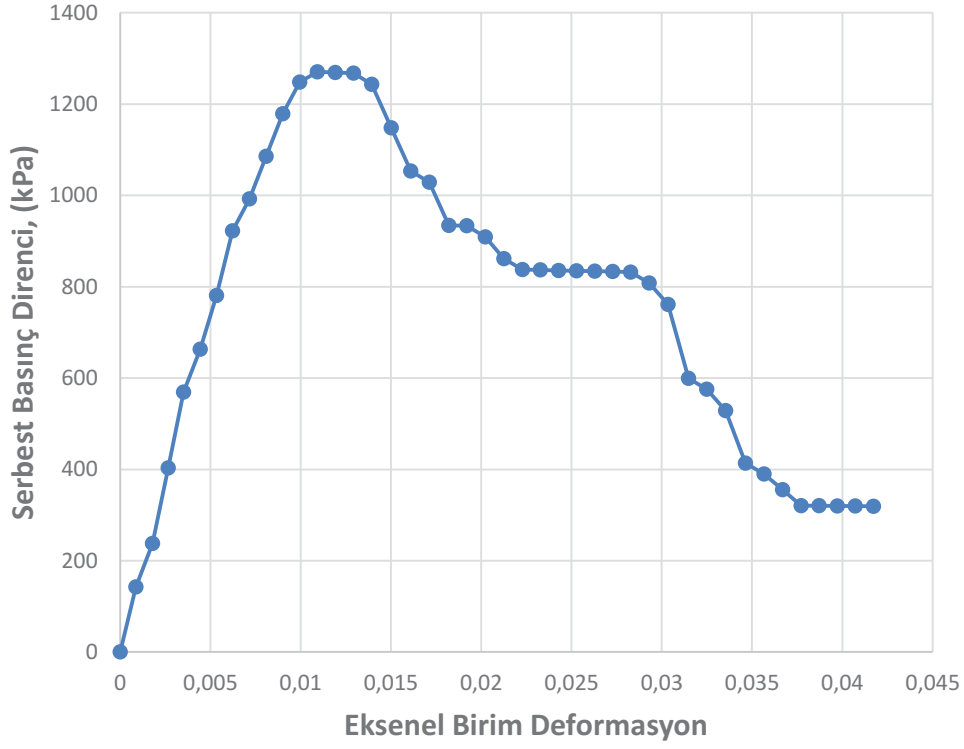
Şekil A.6 : 5-10-4 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



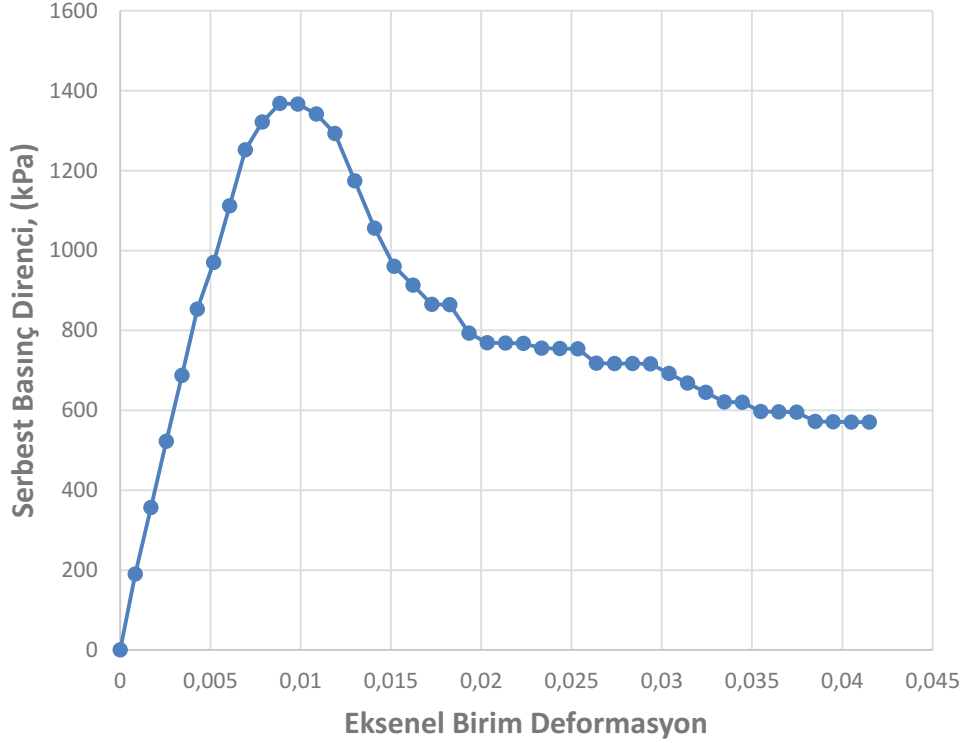
Şekil A.7 : 10-0-1 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



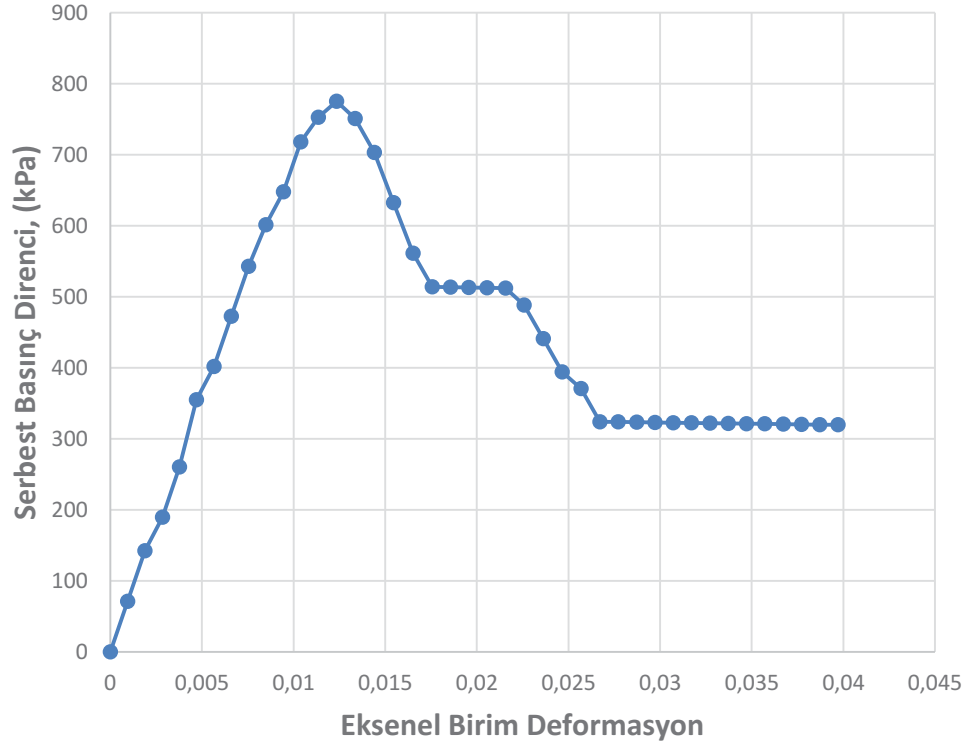
Şekil A.8 : 10-0-2 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



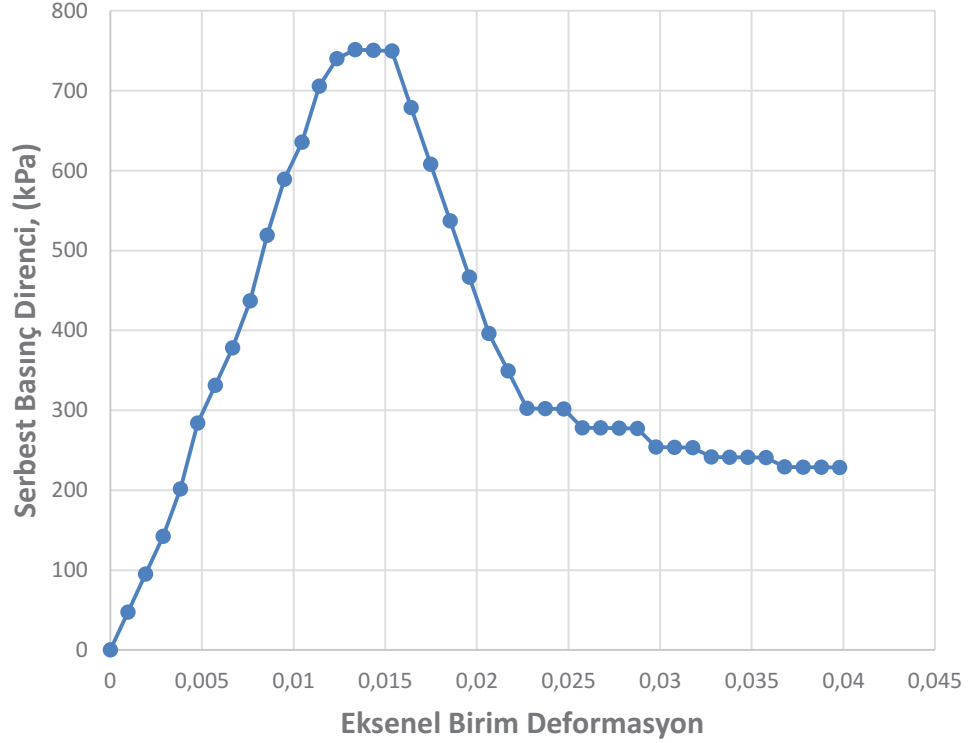
Şekil A.9 : 10-5-1 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



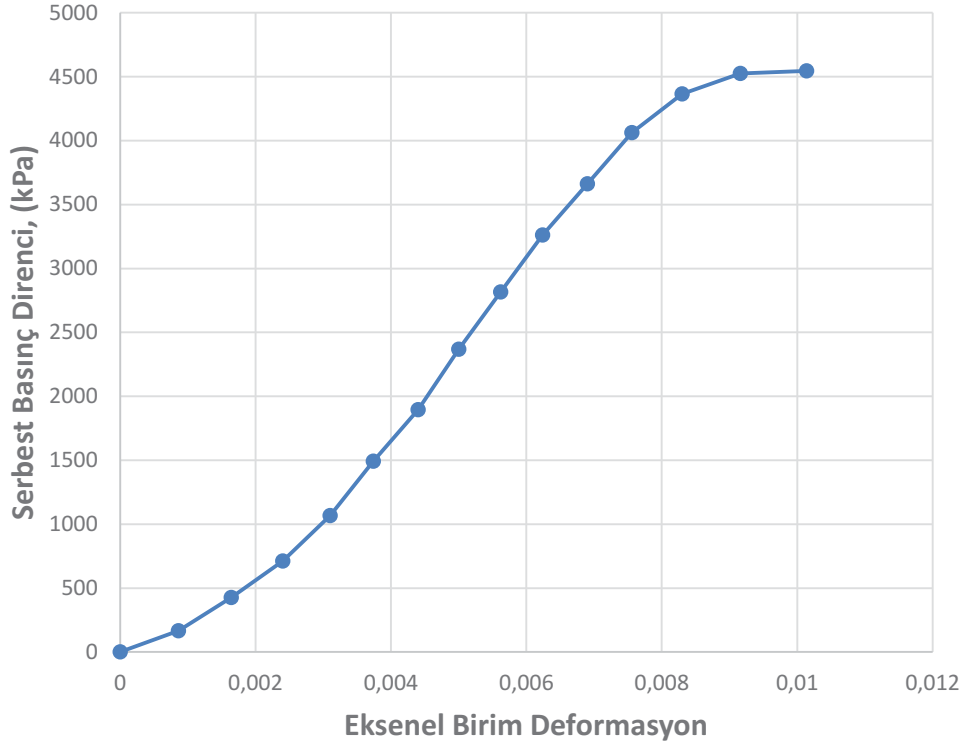
Şekil A.10 : 10-5-2 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



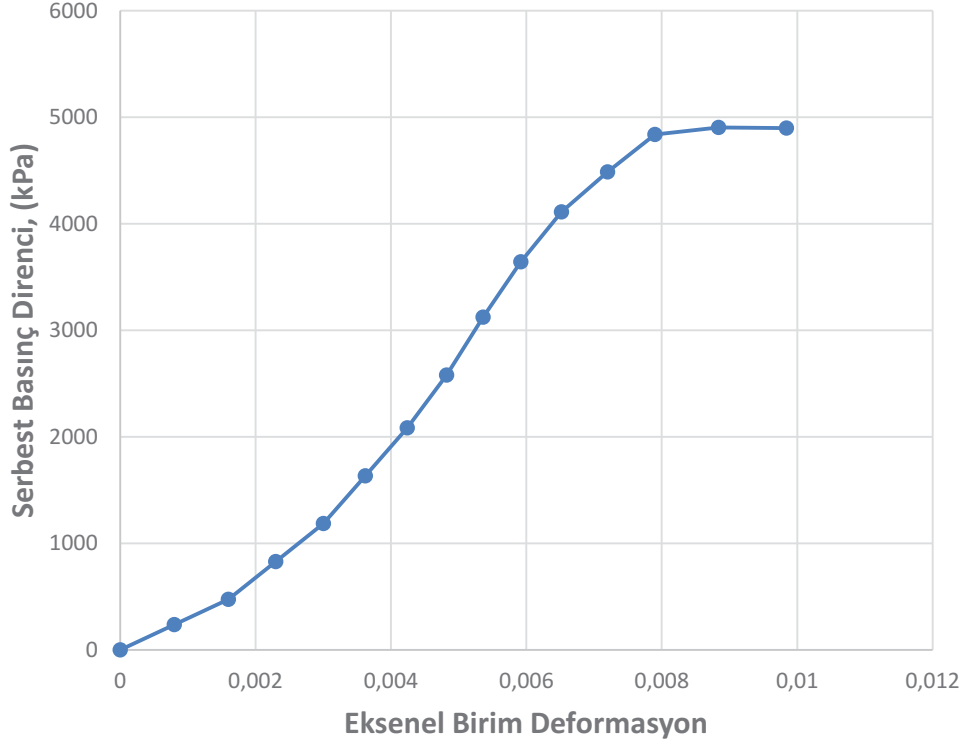
Şekil A.11 : 10-10-4 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



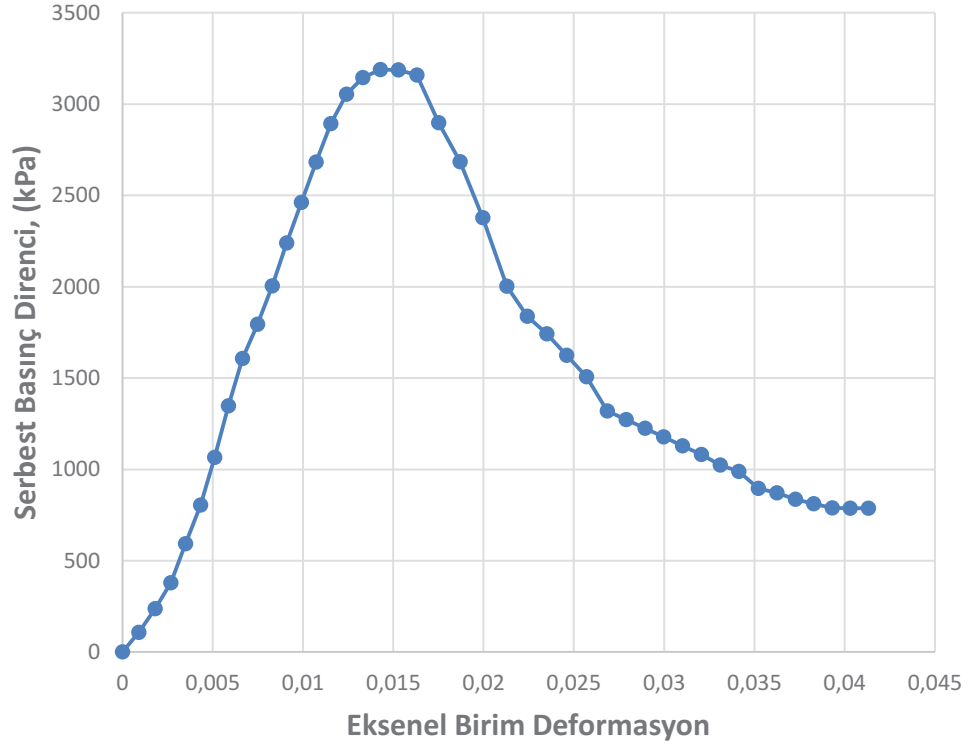
Şekil A.12 : 10-10-3 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



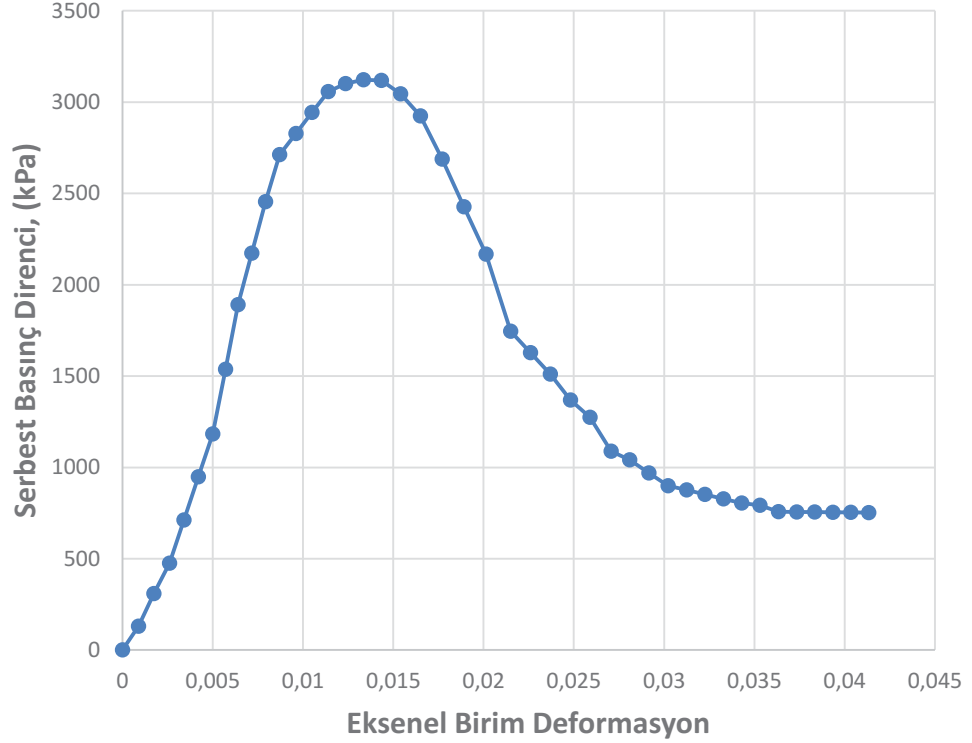
Şekil A.13 : 15-0-2 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



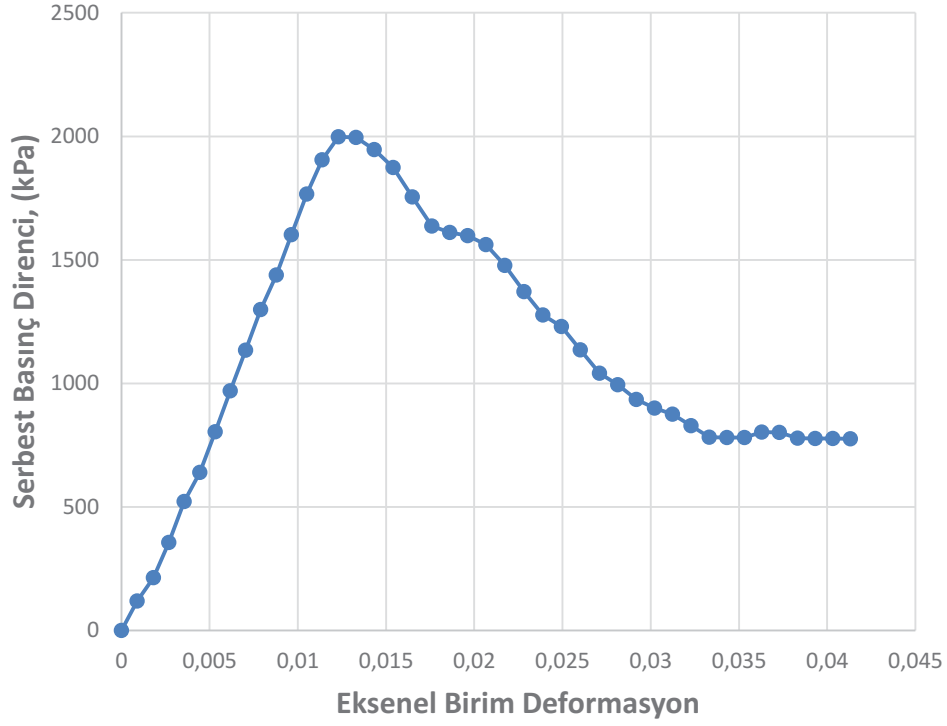
Şekil A.14 : 15-0-1 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



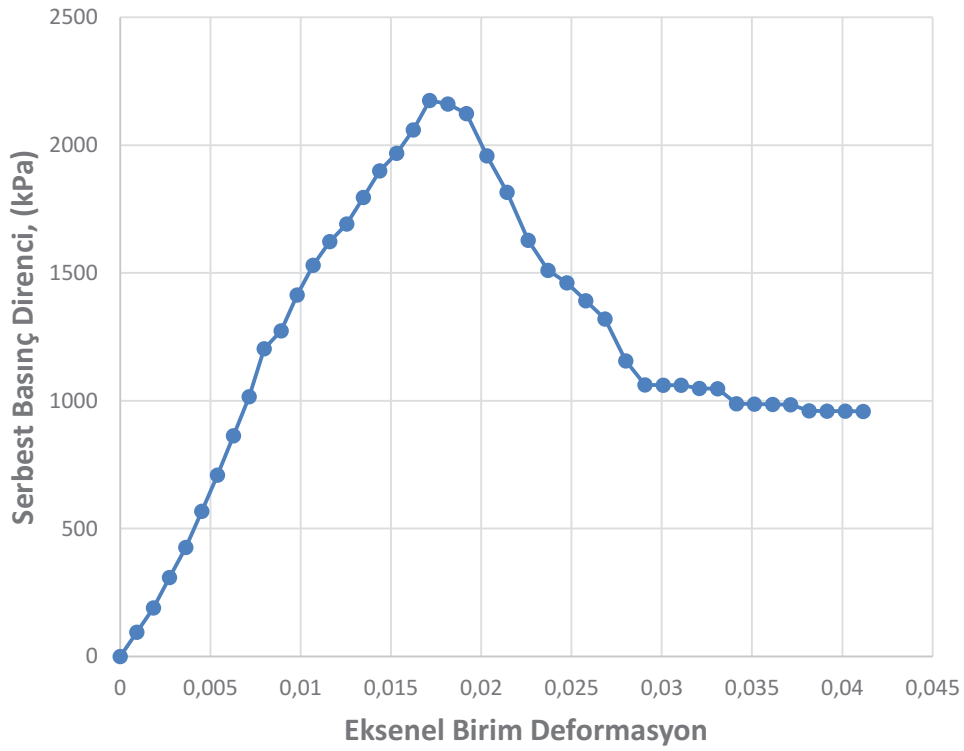
Şekil A.15 : 15-5-3 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



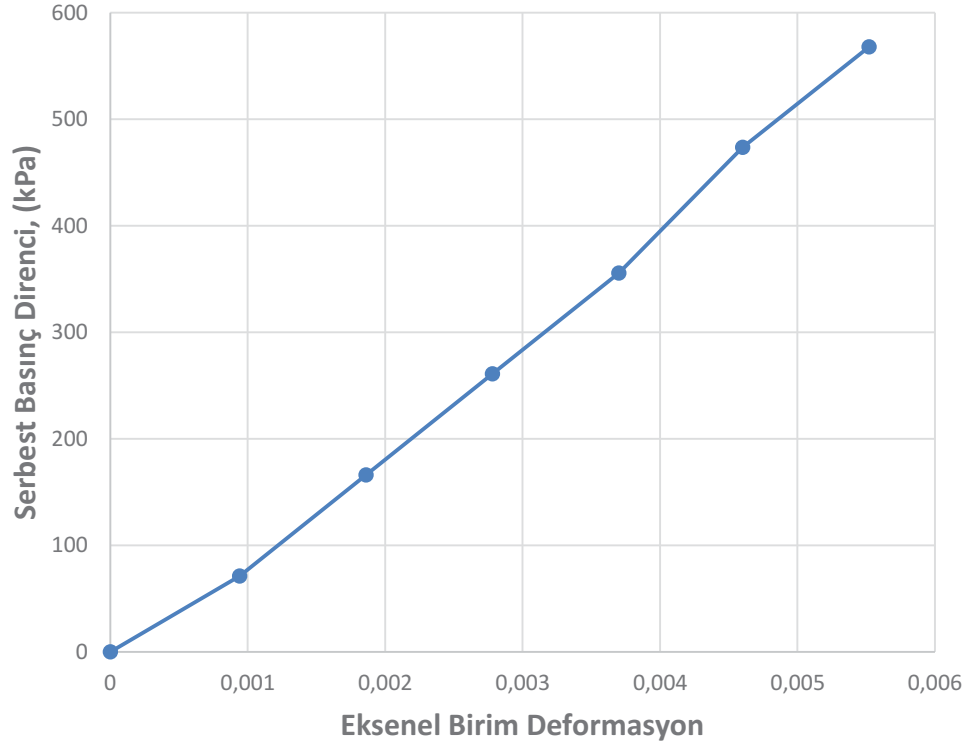
Şekil A.16 : 15-5-1 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



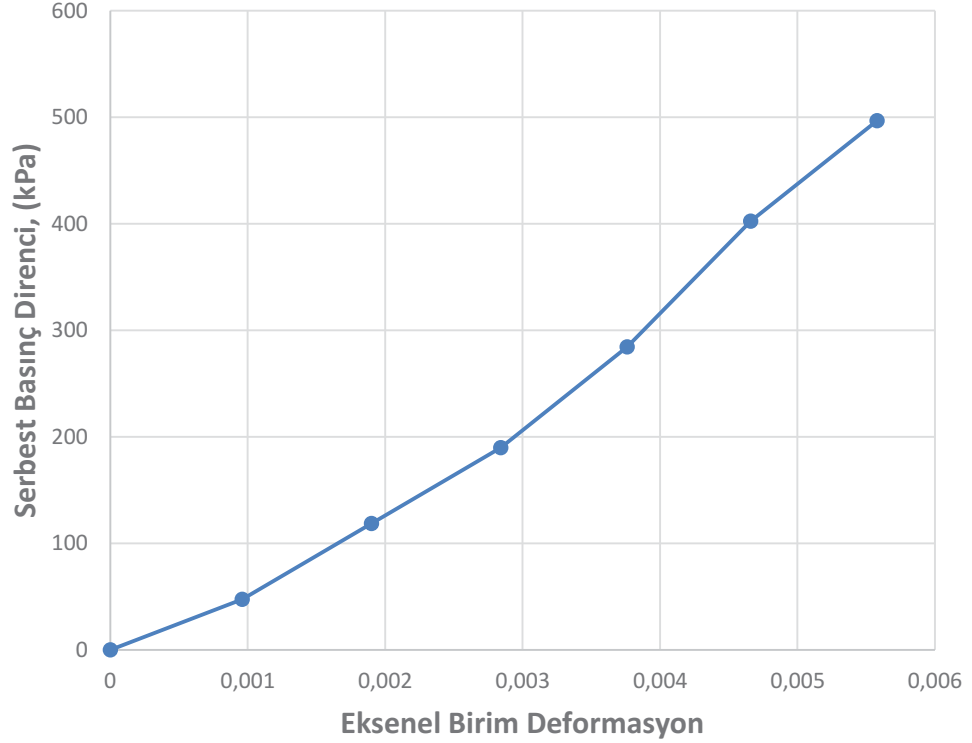
Şekil A.17 : 15-10-3 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



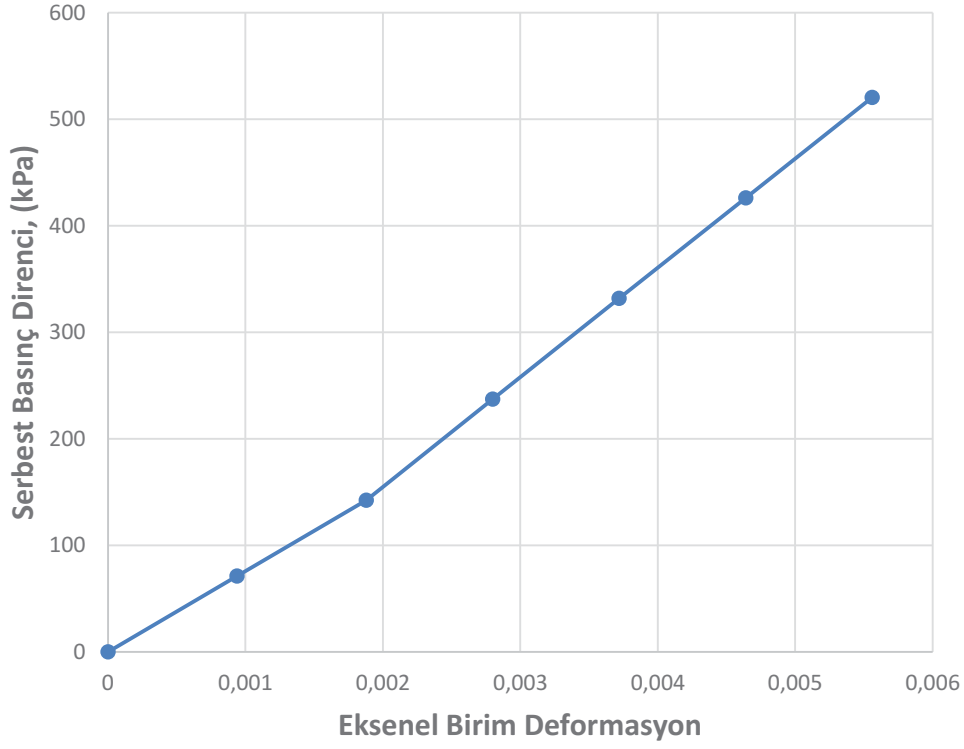
Şekil A.18 : 15-10-4 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



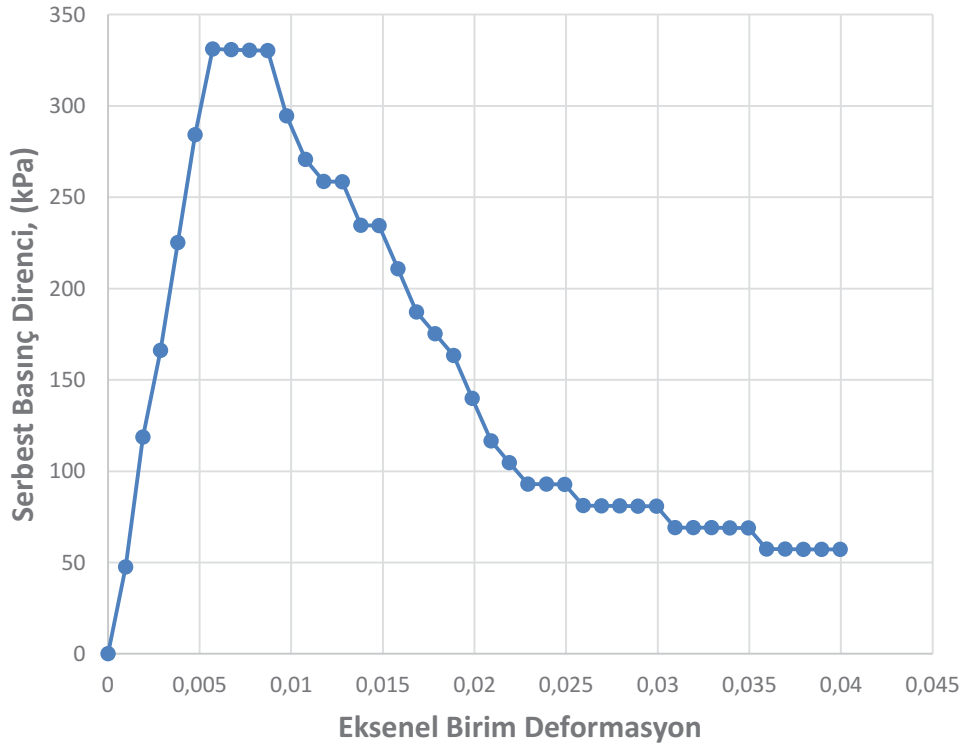
Şekil A.19 : 5-0-1 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.

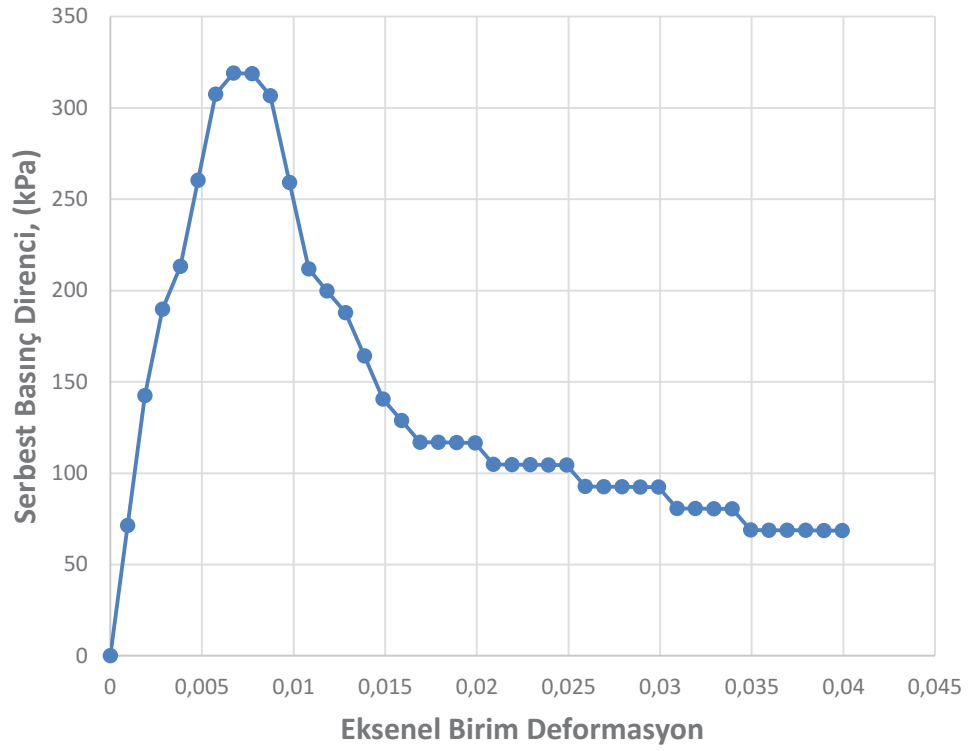


Şekil A.20 : 5-0-2 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.

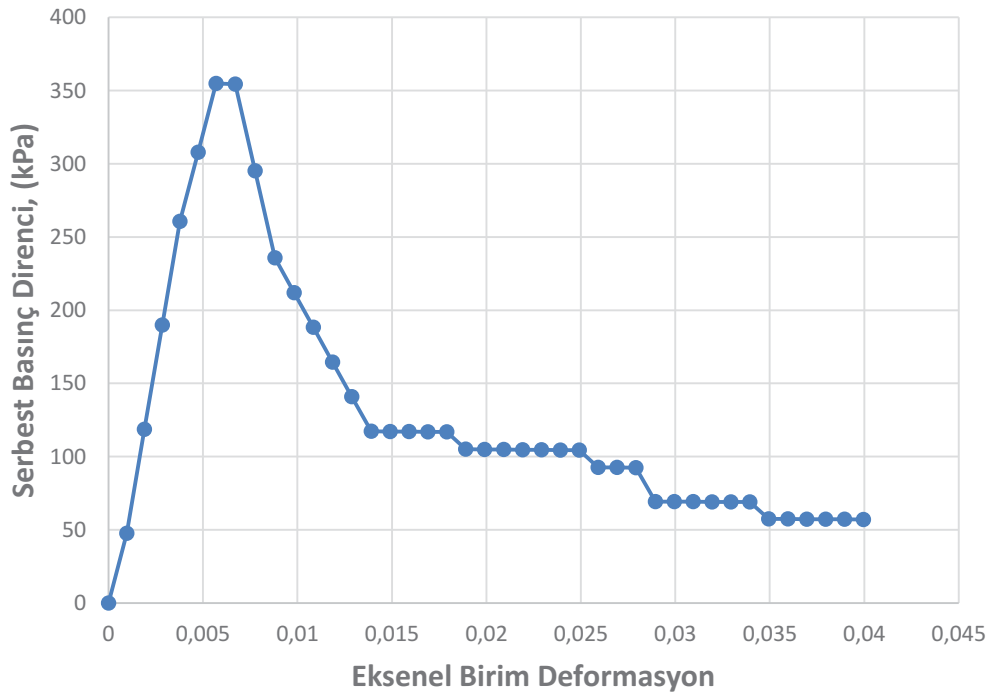


Şekil A.21 : 5-0-3 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.

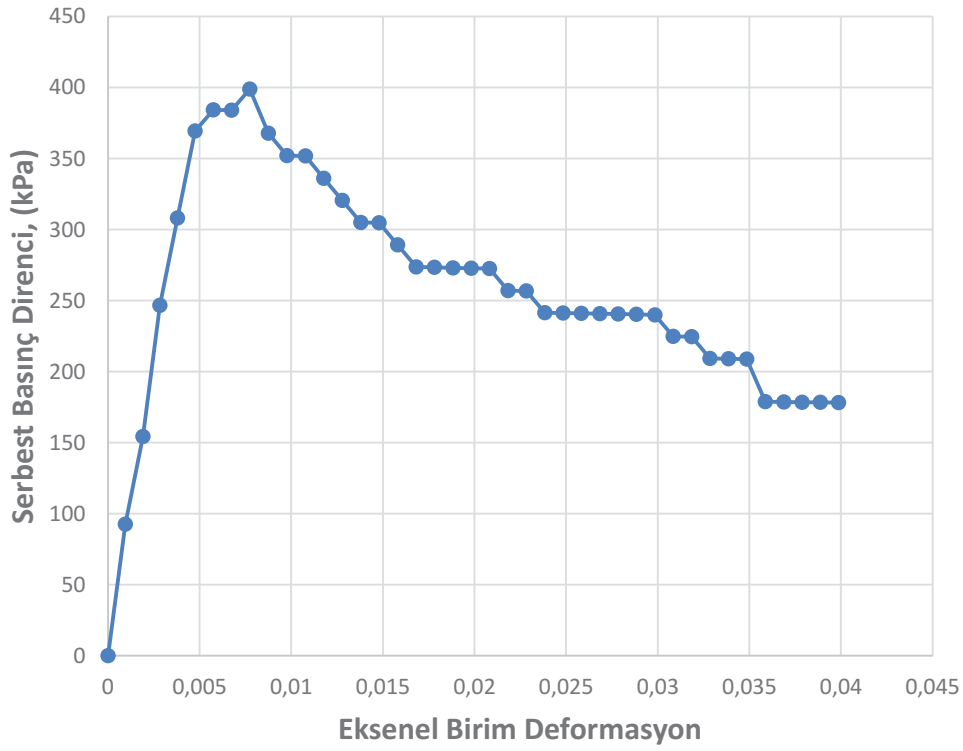




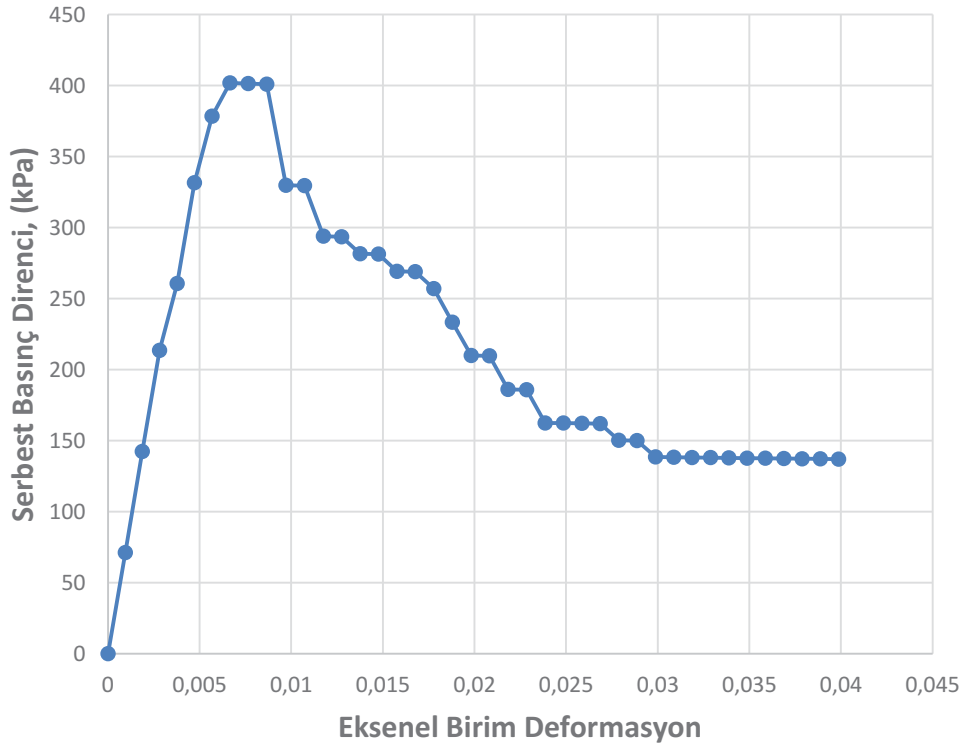
Şekil A.23 : 5-5-1 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



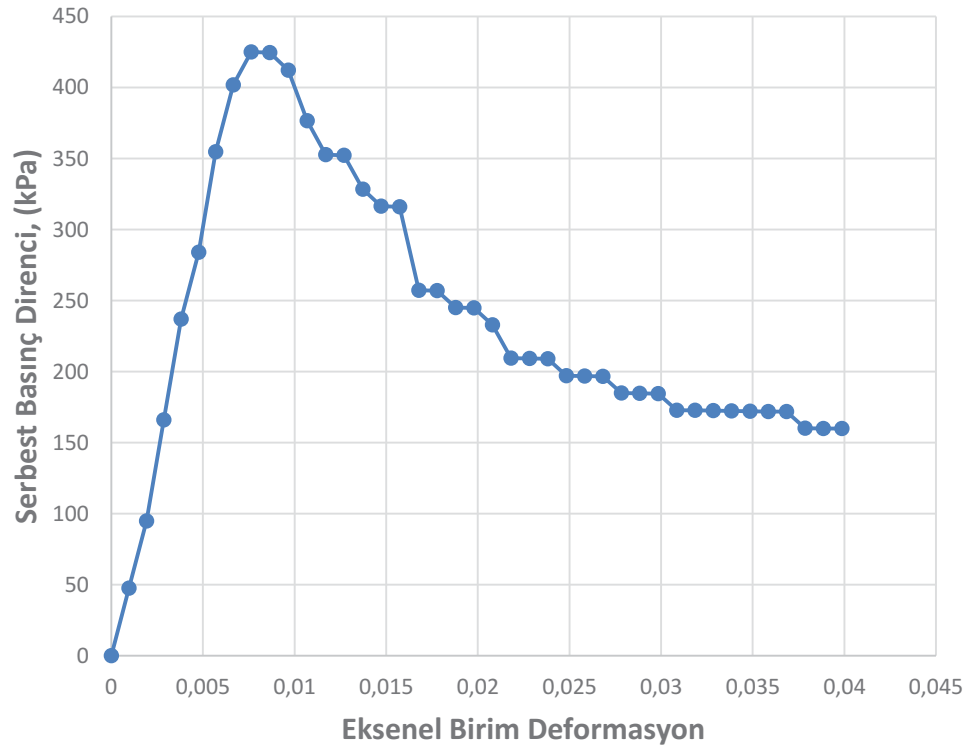
Şekil A.24 : 5-5-5 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



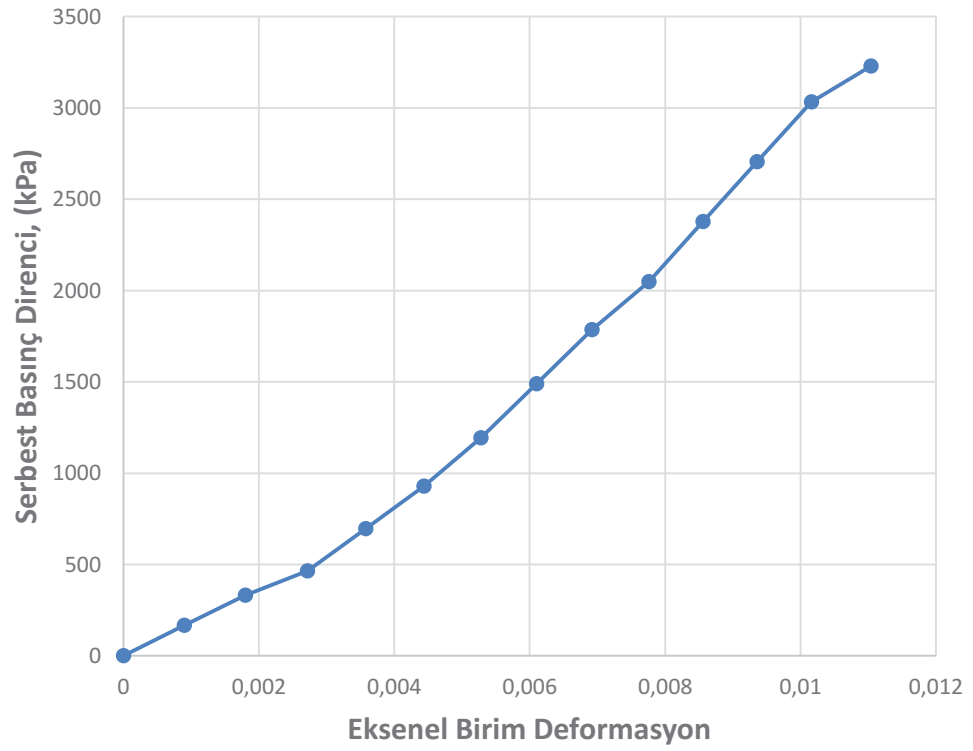
Şekil A.25 : 5-10-5 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



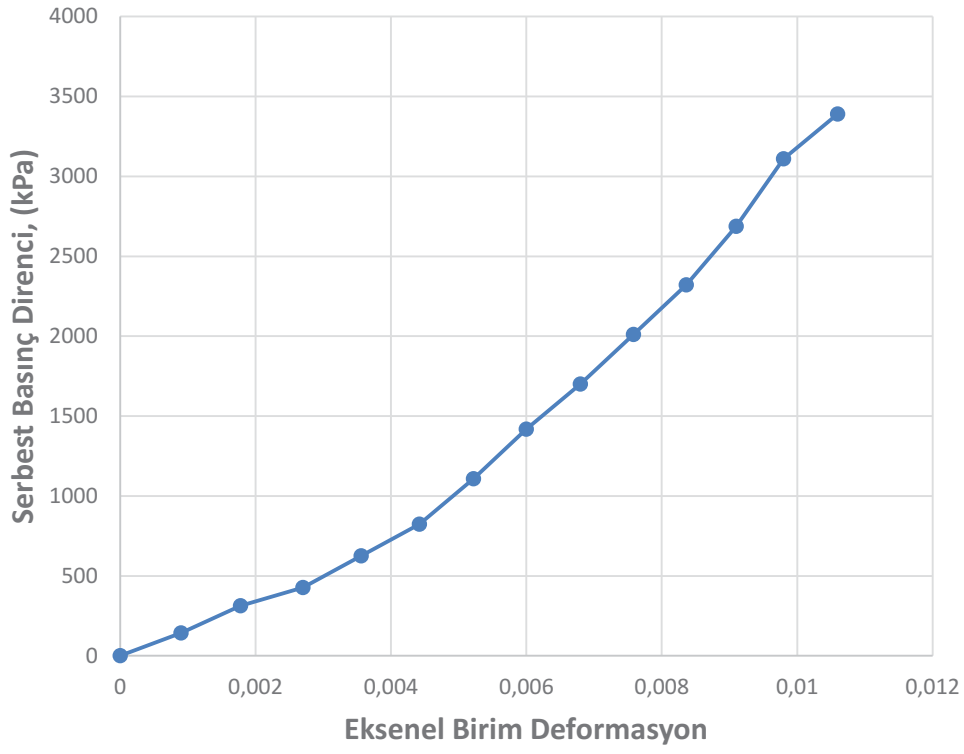
Şekil A.26 : 5-10-1 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



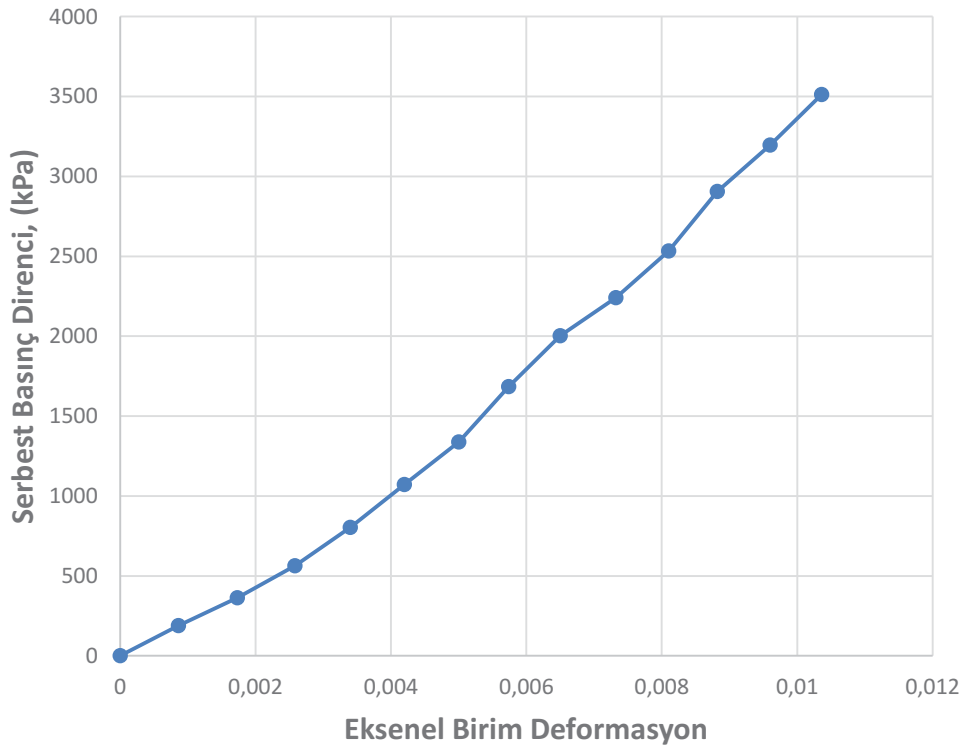
Şekil A.27 : 5-10-3 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



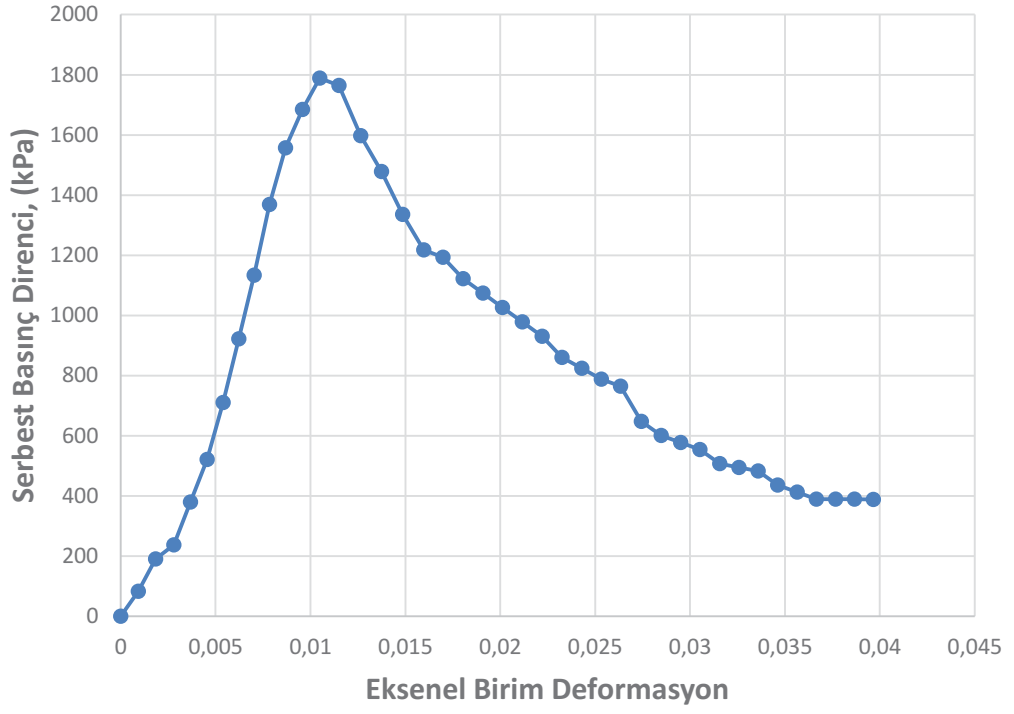
Şekil A.28 : 10-0-5 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



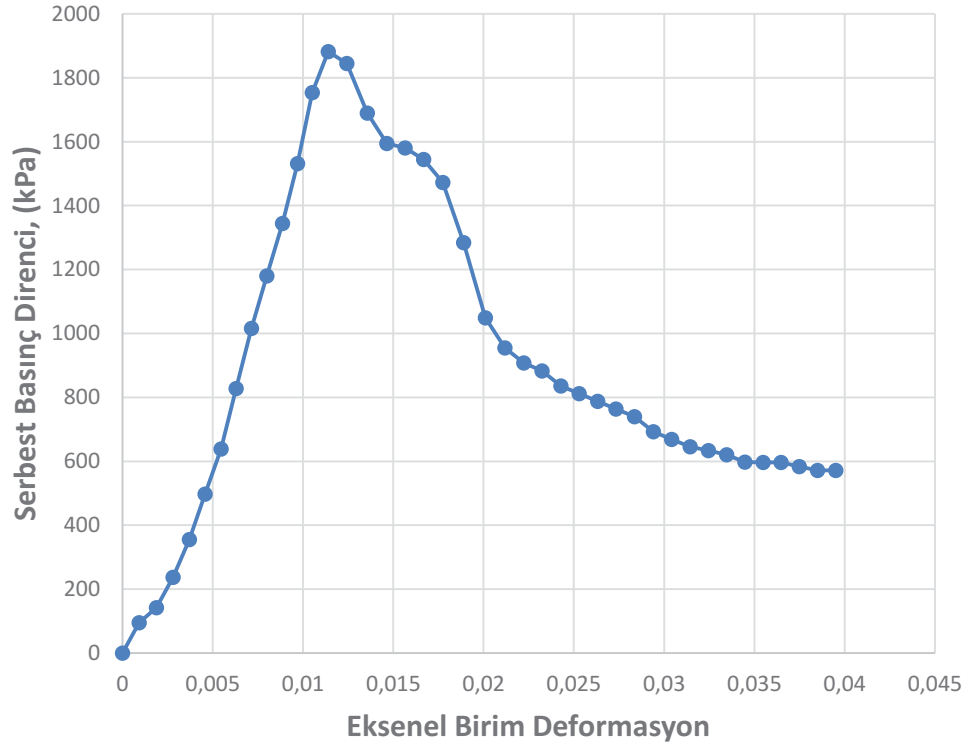
Şekil A.29 : 10-0-4 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



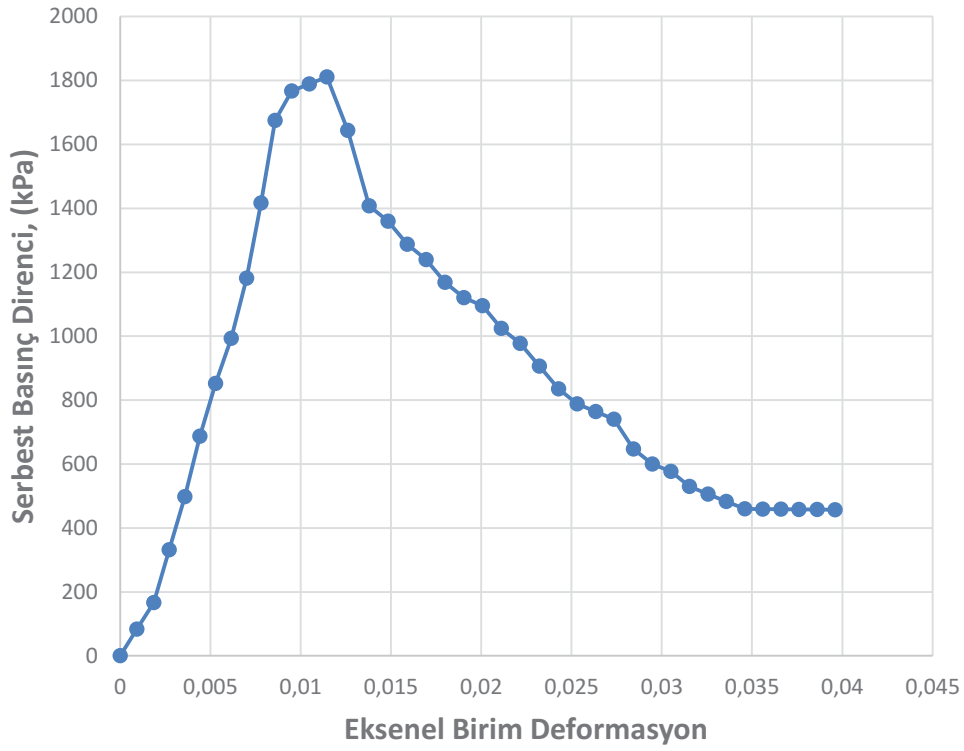
Şekil A.30 : 10-0-3 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



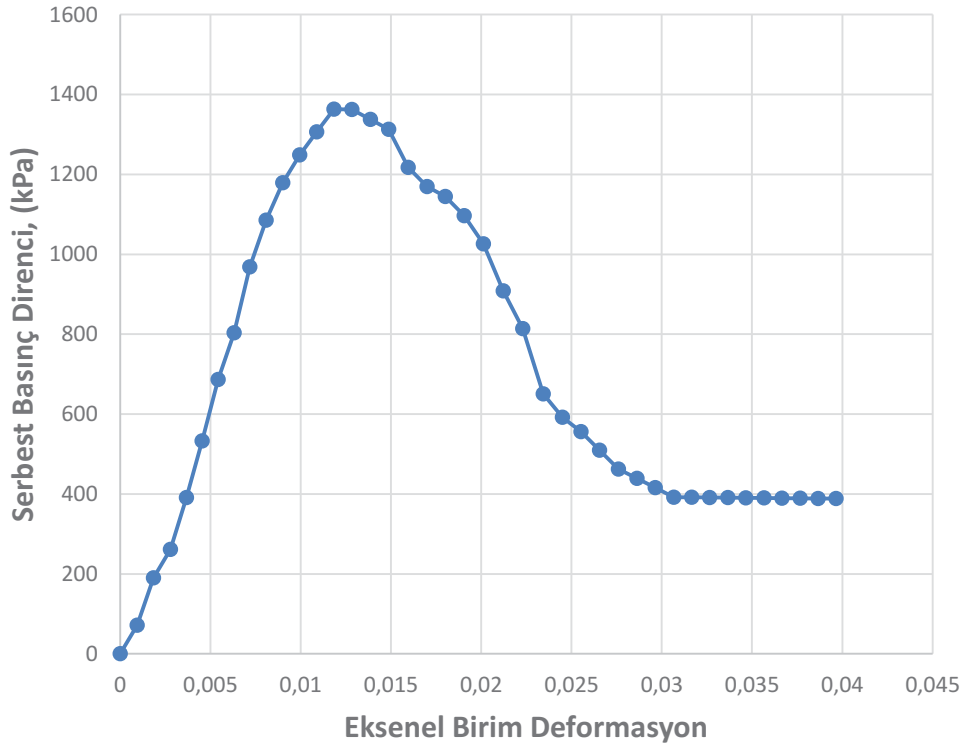
Şekil A.31 : 10-5-3 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



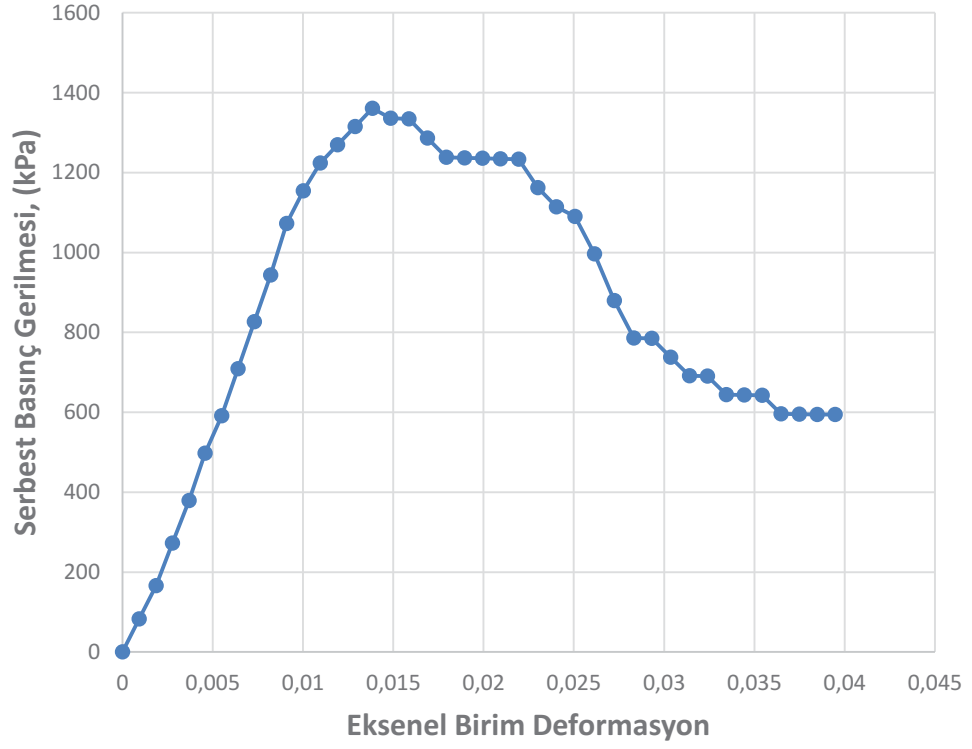
Şekil A.32 : 10-5-4 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



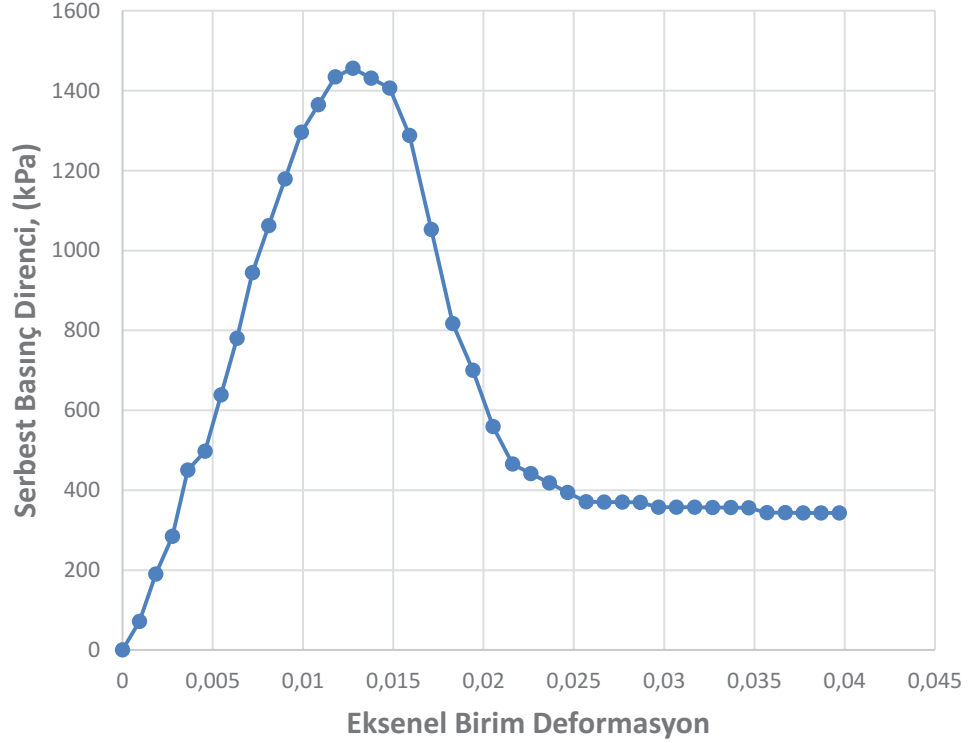
Şekil A.33 : 10-5-5 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



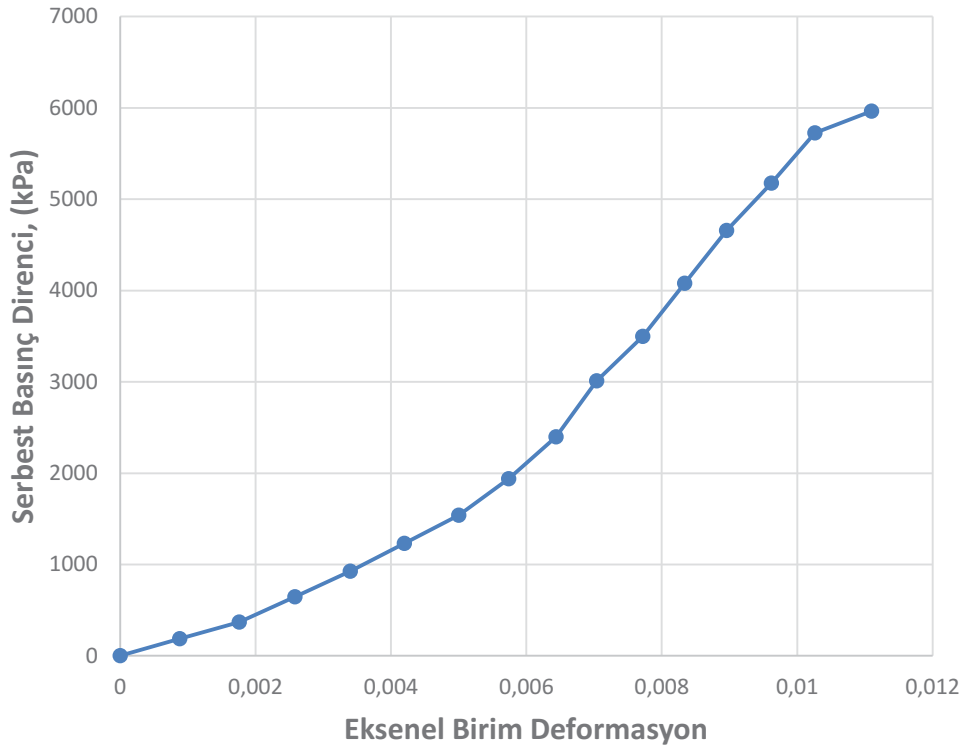
Şekil A.34 : 10-10-1 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



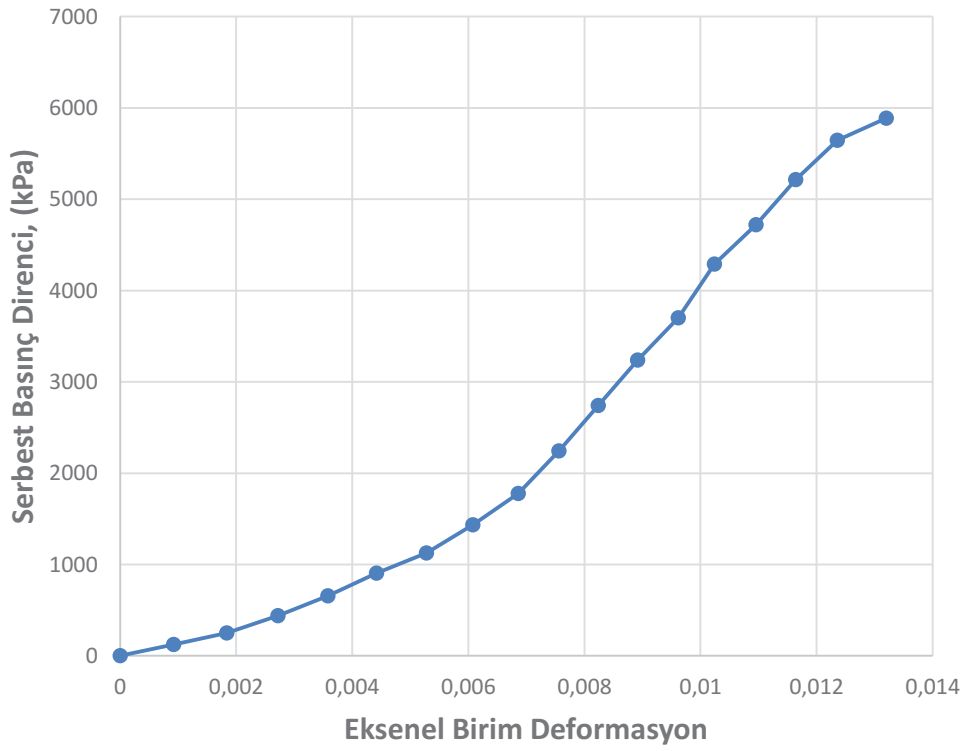
Şekil A.35 : 10-10-2 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



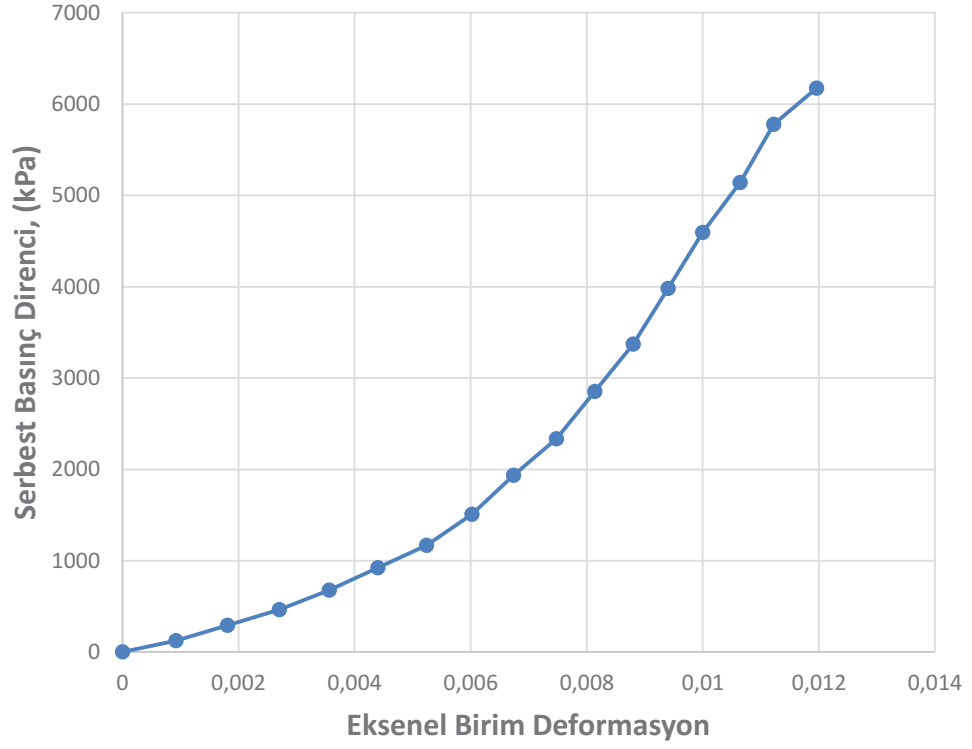
Şekil A.36 : 10-10-5 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



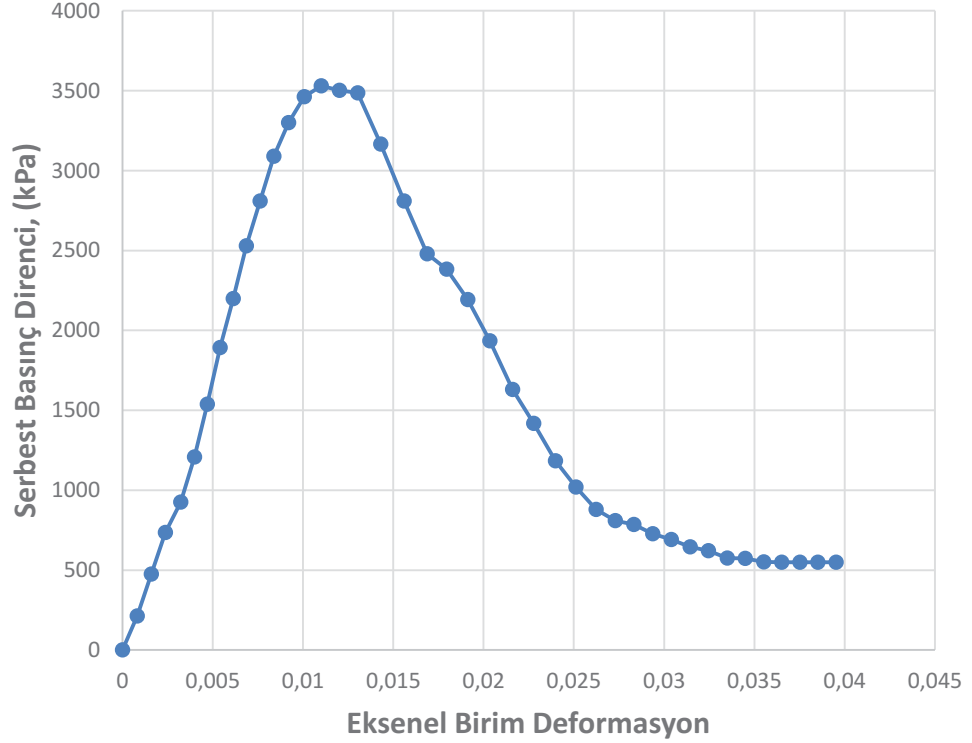
Şekil A.37 : 15-0-3 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



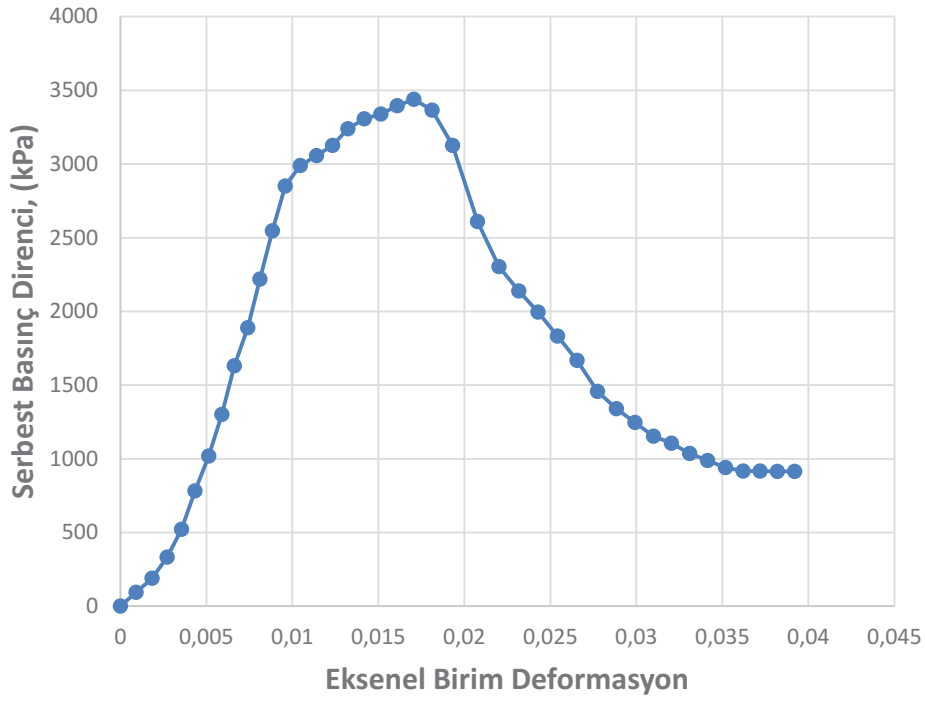
Şekil A.38 : 15-0-4 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



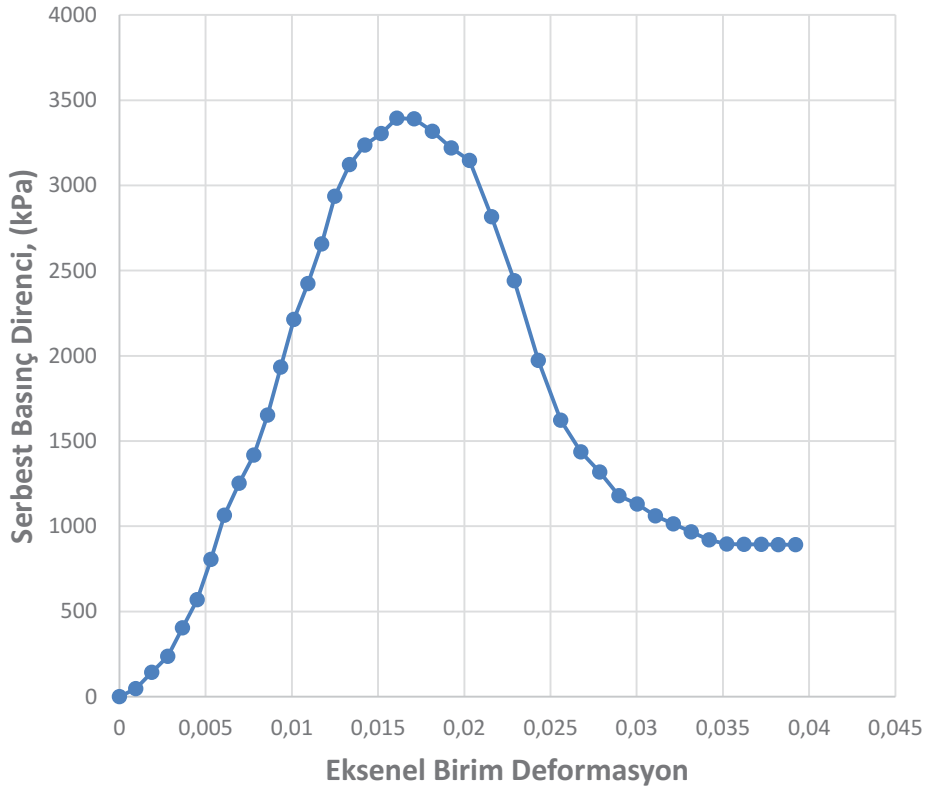
Şekil A.39 : 15-0-5 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



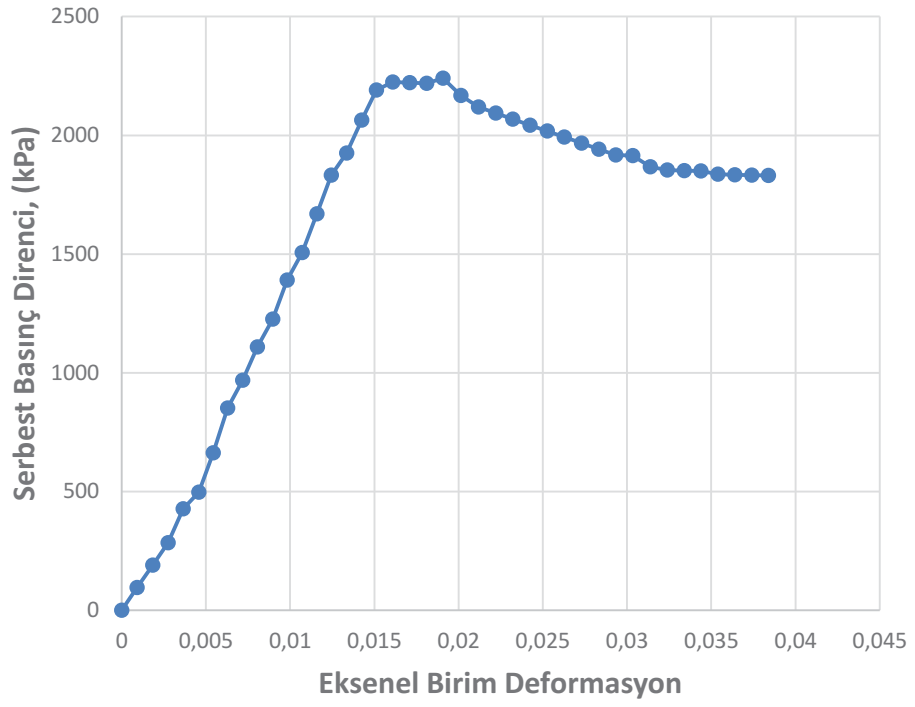
Şekil A.40 : 15-5-2 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



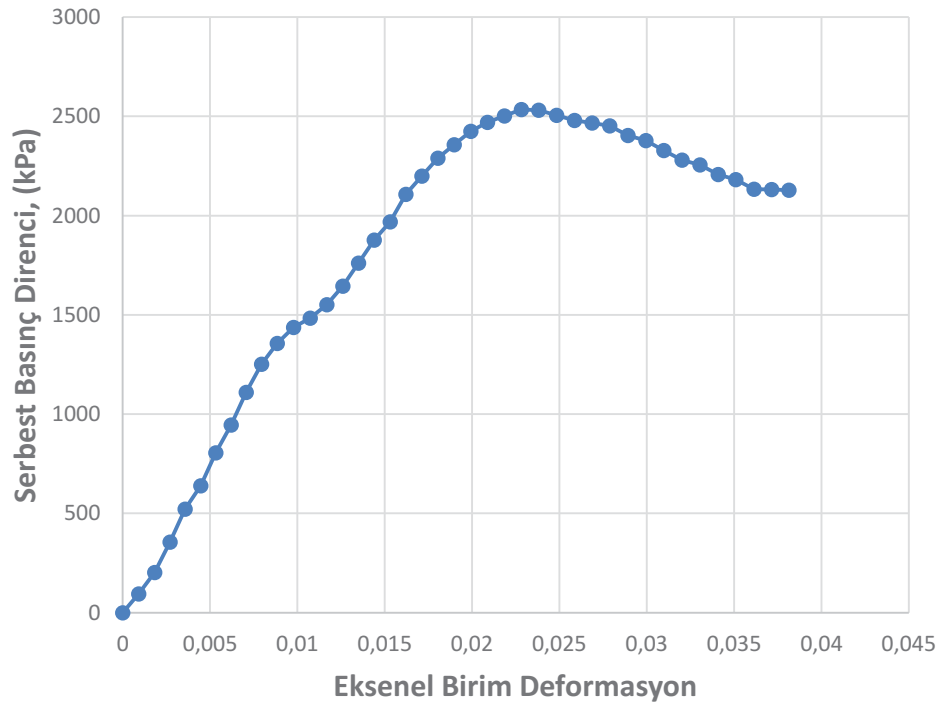
Şekil A.41 : 15-5-4 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



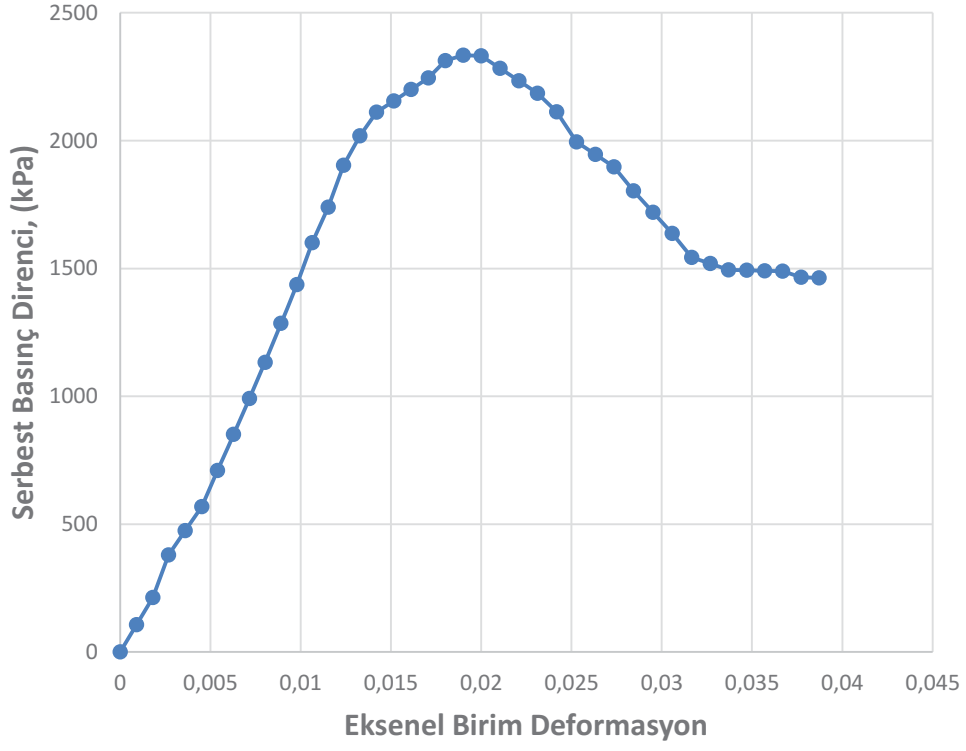
Şekil A.42 : 15-5-5 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



Şekil A.43 : 15-10-1 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



Şekil A.44 : 15-10-2 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.



Şekil A.45 : 15-10-5 numunesinin serbest basınç direnci – eksenel birim deformasyon grafiği.

EK B



Şekil B.1 : Silika kum cam fiber karışımı.



Şekil B.2 : Akpınar kumu ve PPF malzemeleri.



Şekil B.3 : Katkısız kum numunesinin kırılmas sonrası düzenekten çıkarılması.



Şekil B.4 : Numune kalınlığının kontrolü ve düşey deformasyonunun kalibrasyonu.



Şekil B.5 : Farklı çimento oranlarına sahip karışımların hazırlanması ve priz aldıktan sonraki görünüşleri.



Şekil B.6 : Serbest basınç numunelerinin kalıpta bekletilmesi, kalıptan çıkarılması ve nem kaybına karşı korunması.



Şekil B.7 : Bir kısım numunelere ait kırılma şekilleri.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Bahattin Berk Ayraçma
Doğum Tarihi ve Yeri : 9 Şubat 1990, Gölcük
E-posta : berkayracma@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2012 yılında Hakan Kıran Mimarlık ve Yapı Hizmetleri A.Ş.'de Haliç Metro Geçiş Köprüsünde stajyer mühendis olarak çalıştı.
- 2013 yılında Genkon Mühendislik Müşavirlik A.Ş.'de endüstriyel çelik yapıların tasarımında statiker olarak çalıştı.
- 2013-2015 yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak çalıştı.