

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

POLİPROPİLEN FİBER VE UÇUCU KÜL KATKILI ANKARA KİLİNİN
GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÜMİT SEVENCAN

TEMMUZ 2009

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürünün onayı.

...../...../.....

Doç. Dr. Burak BİRGÖREN

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak İNŞAAT Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç Dr. Osman YILDIZ

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumuzu ve Yüksek Lisans olarak bütün gerekliliklerini yerine getirdiğini onaylarım.

Yrd. Doç Dr. Yüksel YILMAZ

Danışman

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Yüksel YILMAZ

.....

Yrd. Doç. Dr. Osman YILDIZ

.....

Yrd. Doç. Dr. Ali Payıdar AKGÜNGÖR

.....

ÖZET

POLİPROPİLEN FİBER VE UÇUCU KÜL KATKILI ANKARA KİLİNİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

SEVENCAN, Ümit

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Anabilim Dalı, Yüksek Lisans tezi

Danışman: Yrd. Doç Dr. Yüksel Yılmaz

Temmuz 2009, 51 sayfa

Bu deneysel çalışmada yüksek plastisiteli Ankara kilinin mühendislik özelliklerinin, değişik oranlarda polipropilen fiber ve Çayırhan uçucu külü katkılarıyla nasıl değiştiği araştırılmıştır. İlk olarak Çayırhan uçucu külü ve Ankara kilinin sınıflama deneyleri yapılmıştır. Daha sonra Ankara kilinin kompaksiyon karakteristikleri tek başına ve üç farklı uçucu kül içeriğiyle (uçucu külün kile oranı kuru ağırlıkça %10.0, %20.0 ve %30.0) standart Proctor kompaksiyon enerjisi kullanılarak elde edilmiştir. Bu aşamadan sonra, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içerikleri belirlenen katkısız ve üç farklı uçucu kül katkılı Ankara

kilinin fibersiz ve fiberli karışımları elde edilmiştir. Fiber-kil ve Fiber-uçucu kül-kil karışımlarda fiberin kile oranı kuru ağırlıkça %0.5 ve %1.0 olarak belirlenmiştir. Çalışmada 6.0 mm ve 19.0 mm olmak üzere iki farklı boyda ve M tipi ve F tipi olmak üzere iki farklı tipte fiber kullanılmıştır. Toplam 20 farklı fiber-kum-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımları ASTM D 2166 standardına göre elde edilmiştir. Uçucu kül puzolanik bir malzeme olduğundan kür süresinin dayanım üzerindeki etkisini görmek amacıyla fibersiz uçucu kül-kil karışımları 1 gün, 7 gün, 14 gün ve 28 gün kür ortamında bekletildikten sonra tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Fiber-uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımları sadece 28 gün kürde bekletildikten sonra elde edilmiştir.

Standart Proctor kompaksiyon deney bulgularına göre, uçucu kül-kil karışımlarındaki uçucu kül oranı arttıkça karışımın optimum su içeriği azalırken maksimum kuru birim hacim ağırlık artmaktadır. Tek eksenli basınç deneyleri sonucunda, karışımdaki uçucu kül oranı veya kür süresi arttıkça karışımın tek eksenli basınç dayanımının da arttığı görülmüştür. Son olarak, fiber tipinin ve fiber boyunun tek eksenli basınç dayanımını etkilediği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Kil, Uçucu kül, Polipropilen fiber, Kompaksiyon

karakteristikleri, Tek eksenli basınç dayanımı, Ankara Kili

ABSTRACT

INVESTIGATION OF GEOTECHNICAL PROPERTIES OF POLYPROPYLENE
FIBER AND FLY ASH AMMENDED
ANKARA CLAY

SEVENCAN, Ümit

Kırıkkale University

Graduate School Of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, M. Sc. Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Yüksel Yılmaz

July 2009, 51 pages

In this experimental study the effect of various ratios of polypropylene fiber and Çayırhan fly ash additives on the engineering properties of high plasticity Ankara clay has been investigated. Firstly, classification experiments of Çayırhan fly ash and Ankara clay are carried out. Then, compaction characteristics of Ankara clay alone and with three different fly ash content (Fly ash/Clay = 10.0%, 20.0 % and 30.0 % by dry weight) are obtained with standard Proctor compaction energy. After determining maximum dry unit weight and optimum water content of the pure clay and fly ash-clay mixtures, pure Ankara clay and three different fly ash-clay mixtures

are prepared with and without polypropylene fiber. The ratios of fiber to the clay for the fiber-clay and fiber-fly ash-clay mixtures are chosen 0.5% and 1.0% by dry mass. In the study two different types of fiber (M type fiber and F type fiber) with two different lengths (6.0 mm and 19.0 mm) are used. Unconfined compression strength of 20 different fiber-fly ash-clay mixtures is obtained according to ASTM D 2166 standard. Since, fly ashes are pozzolanic materials, to determine the effect of curing period on the strength, fly ash-clay mixtures without fiber were subjected to unconfined compression tests after 1day, 7 days, 14 days, and 28 days curing periods. Unconfined compressive strength of fiber-fly ash-clay mixtures were determined just for 28 days curing periods.

According to standard Proctor compaction tests, as the fly ash content increases in the fly ash-clay mixtures, optimum water content decreases and maximum dry unit weight increases. Unconfined compression tests revealed that as the fly ash content in mixture or curing period increases, unconfined compression strength of the mixtures increases. Lastly it is seen that both fiber type and fiber size affects unconfined compressive strength.

Key words: Clay, Fly ash, Polypropylene fiber, Compaction characteristics,

Unconfined compressive strength, Ankara Clay

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, hocam Yrd. Doç. Dr. Yüksel YILMAZ'a, ayrıca laboratuvar çalıőmalarımda, yardımlarını esirgemeyen Uzman Aydın GÖKÇE'ye , manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan Ali Osman SEVENCAN'a ve son olarak çok sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	9
2.1. Çalışmada Kullanılan Kil ve Uçucu Kül	10
2.1.1. Çayırhan Termik Santrali Uçucu Külünün Özellikleri.....	11
2.2. Çalışmada Kullanılan Polipropilen Fiberler	12
2.3. Numune Sıkıştırma Aparatı.....	14
3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	17
3.1. Laboratuvar Kompaksiyon Karakteristikleri.....	17
3.2. Tek Eksenli Basınç Deneyleri	20
3.2.1. Uçucu Kül Katkısı ile Gerçekleştirilen Tek Eksenli Basınç Deneyleri.....	20
3.2.2. Uçucu Kül ve Polipropilen Fiber Katkısı ile Gerçekleştirilen Tek Eksenli Basınç Deneyleri.....	31
4. SONUÇLAR.....	47
KAYNAKLAR	49

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge

- 2.1. Çalışmada kullanılan kil ve uçucu külün bazı fiziksel özellikleri11
- 2.2. Çalışmada kullanılan fiberlerin bazı fiziksel özellikleri14

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil

2.1. Çalışmada kullanılan kil ve uçucu külün tane boyutu dağılım eğrileri.....	11
2.2. Çalışmada kullanılan F tipi polipropilen fiber	13
2.3. Çalışmada kullanılan M tipi polipropilen fiber	13
2.4. Mukavemet deney numunesi hazırlama aparatı (a) tüm parçaların görünüşü (b) numune sıkıştırmaya hazır hali.....	15
3.1. Uçucu kül-kil karışımlarının standart Proctor kompaksiyon eğrileri	17
3.2. Uçucu kül-kil karışımlarının optimum su içeriklerinin karışımdaki UÇK oranı ile değişimi.....	18
3.3. Uçucu kül-kil karışımlarının maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının karışımdaki UÇK oranı ile değişimi.	19
3.4. Tek eksenli basınç deneyi için hazırlanmış numuneler.....	21
3.5. 1 gün kürde bekletildikten sonra tek eksenli basınç deneyine tabi tutulan uçucu kül-kil karışımlarının deviator gerilme - eksenel birim deformasyon ilişkileri.	22
3.6. 7 gün kürde bekletildikten sonra tek eksenli basınç deneyine tabi tutulan uçucu kül-kil karışımlarının deviator gerilme–eksenel birim deformasyon ilişkileri.	23
3.7. 14 gün kürde bekletildikten sonra tek eksenli basınç deneyine tabi tutulan sonrasında uçucu kül-kil karışımlarının deviator gerilme –eksenel birim deformasyon ilişkileri.	24

3.8.	28 gün kürde bekletildikten sonra tek eksenli basınç deneyine tabi tutulan sonrasında uçucu kül-kil karışımlarının deviator gerilme - eksenel birim deformasyon ilişkileri.	25
3.9.	1 gün kürde bekletildikten sonra uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımlarının karışımdaki uçucu kül oranı ile değişimi.	26
3.10.	7 gün kürde bekletildikten sonra uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımlarının karışımdaki uçucu kül oranı ile değişimi.	27
3.11.	14 gün kürde bekletildikten sonra uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımlarının karışımdaki uçucu kül oranı ile değişimi.....	28
3.12.	28 gün kürde bekletildikten sonra uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımlarının karışımdaki uçucu kül oranı ile değişimi.....	29
3.13.	Her bir kür süresi için uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımlarının saf kilin tek eksenli basınç dayanımına nazaran yüzde artışı.....	30
3.14.	Fiber katkısı ile hazırlanmış deney numunesi (a) ve tek eksenli basınç deneyinde kırılmış deney numunesi (b).....	32
3.15.	28 gün kürde bekletildikten sonra tek eksenli basınç deneyine tabi tutulan uçucu kül/kil oranı %0 ve fiber/kil oranı %0.5 olan fiber-uçucu kül-kil karışımlarının deviator gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkileri.....	33
3.16.	28 gün kürde bekletildikten sonra tek eksenli basınç deneyine tabi tutulan uçucu kül/kil oranı %0 ve fiber/kil oranı %1.0 olan	

fiber-uçucu kül-kil karışımlarının deviator gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkileri.....	34
3.17. 28 gün kürde bekletildikten sonra tek eksenli basınç deneyine tabi tutulan uçucu kül/kil oranı %10 ve fiber/kil oranı %0.5 olan fiber-uçucu kül-kil karışımlarının deviator gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkileri.....	35
3.18. 28 gün kürde bekletildikten sonra tek eksenli basınç deneyine tabi tutulan uçucu kül/kil oranı %10 ve fiber/kil oranı %1.0 olan fiber-uçucu kül-kil karışımlarının deviator gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkileri.....	36
3.19. 28 gün kürde bekletildikten sonra tek eksenli basınç deneyine tabi tutulan uçucu kül/kil oranı %30 ve fiber/kil oranı %0.5 olan fiber-uçucu kül-kil karışımlarının deviator gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkileri.	37
3.20. 28 gün kürde bekletildikten sonra tek eksenli basınç deneyine tabi tutulan uçucu kül/kil oranı %30 ve fiber/kil oranı %1.0 olan fiber-uçucu kül-kil karışımlarının deviator gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkileri.	39
3.21. M06 tipi fiberlerin kil ile karıştırılması.....	40
3.22. 28 gün kürde bekletildikten sonra deneyine tabi tutulan uçucu kül/kil oranı %0 ve fiber/kil oranı %0.5 olan fiber-uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımlarının fiber türü ve boyu ile değişimi.	41
3.23. 28 gün kürde bekletildikten sonra deneyine tabi tutulan uçucu kül/kil oranı %0 ve fiber/kil oranı %1.0 olan fiber-uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımlarının fiber türü ve boyu	

ile değişimi.	42
3.24. 28 gün kürde bekletildikten sonra deneyine tabi tutulan uçucu kl/kil oranı %10 ve fiber/kil oranı %0.5 olan fiber-uçucu kl-kil karışımlarının tek eksenli basınę dayanımlarının fiber türü ve boyu ile değişimi.	43
3.25. 28 gün kürde bekletildikten sonra deneyine tabi tutulan uçucu kl/kil oranı %10 ve fiber/kil oranı %1.0 olan fiber-uçucu kl-kil karışımlarının tek eksenli basınę dayanımlarının fiber türü ve boyu ile değişimi.	44
3.26. 28 gün kürde bekletildikten sonra deneyine tabi tutulan uçucu kl/kil oranı %30 ve fiber/kil oranı %0.5 olan fiber-uçucu kl-kil karışımlarının tek eksenli basınę dayanımlarının fiber türü ve boyu ile değişimi.	45
3.27. 28 gün kürde bekletildikten sonra deneyine tabi tutulan uçucu kl/kil oranı %30 ve fiber/kil oranı %1.0 olan fiber-uçucu kl-kil karışımlarının tek eksenli basınę dayanımlarının fiber türü ve boyu ile değişimi.	46

SİMGELER DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
γ_d	Kuru birim hacim ağırlık, kN/m^3
$\gamma_d (\text{max})$	Maksimum kuru birim hacim ağırlık, kN/m^3
G_s	Özgül ağırlık (Bağıl Yoğunluk)
q_u	Tek eksenli basınç dayanımı, kN/m^2
w_{opt}	Optimum su muhtevası , %
σ	Deviatör gerilme, kN/m^2
ε	Birim deformasyon

1. GİRİŞ

Zeminin mühendislik malzemesi olarak kullanılabilmesi (örneğin, toprak barajlarda, karayolu dolgularında, göletlerde, vb.) için zemin özelliklerinin istenilen şartları sağlaması gereklidir. Proje sahasındaki zeminin mevcut haliyle kullanılması ekonomik açıdan tercih sebebidir. İstenilen özellikleri taşımayan zeminlerin çoğu zaman stabilize edilmesi veya mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi kaçınılmazdır. Başka alternatif yöntemler olmakla beraber mekanik stabilizasyon veya yoğunlaştırma anlamına gelen sıkıştırma (kompaksiyon) en yaygın olarak kullanılan yöntemlerdendir ⁽¹⁾.

Düşük dayanıma sahip zeminlerin mekanik stabilizasyonunda geleneksel olarak çimento, kireç, uçucu kül gibi katkı maddeleri kullanılmaktadır. Diğer yandan geleneksel katkı maddelerine alternatif olarak polipropilen fiber, organik fiber, parçalanmış araba lastiği fiberi, çelik fiber, vs., gibi değişik katkı maddelerinin kullanılması da son zamanlarda araştırmacıların dikkatini çekmektedir ⁽²⁾.

Sentetik fiberlerin ince taneli zeminlerin mukavemetine etkisi ilk olarak Freitag ⁽³⁾ (1986) tarafından araştırılmıştır. Yazar bu çalışmasında üç farklı sentetik fiberin (tek katlı naylon ipliği, polipropilen iplik fiberi ve polipropilen olefin tabanlı beton donatı fiberi) CL sınıfı az kumlu rezidüel kireç taşı zemininin dayanımına etkisini araştırmıştır.

Sera vd ⁽⁴⁾. (1990) gevrek malzemelerin dayanım ve sünekliğinin doğal fiberler kullanılarak iyileştirilebilirliğini araştırmıştır. Çalışma sonucuna göre doğal fiberler, süneklik ve dayanım artışına neden olmaktadır. Her ne kadar su geçirmez

olmasa da doğal fiber-kil karışımının tahıl saklama silolarında dayanım ve yalıtım amaçlı kullanılabileceğini önermişlerdir.

Crockford vd ⁽⁵⁾. (1993) laboratuvar ve arazi bulgularına dayanarak polipropilen fiber ile karıştırılan kil zeminlerin yol kaplama malzemesi olarak kullanılmaları durumunda ömürlerinin arttığını ileri sürmektedir. Fiber katkısının malzeme davranışını deformasyon yumuşamasından deformasyon pekleşmesi (strain hardening) davranışına doğru değiştirdiğini gözlemişlerdir.

Maher ve Ho ⁽⁶⁾ (1994) kaolinit/fiber zemin kompozitinin mekanik özelliklerini tek eksenli basınç, yarmada çekme, üç noktalı eğilme ve hidrolik geçirgenlik laboratuvar deneyleriyle belirlemişlerdir. Fiber katkısının kaolinit kilin pik basınç dayanımını, sünekliğini, yarmada çekme dayanımını, bükülgen sertliği (flexural toughness) belirgin bir şekilde arttırdığını göstermişlerdir. Kompozitin dayanım ve sertliğinin artışı fiber uzunluğu ve içeriğinin ve kompozitin su içeriğinin bir fonksiyonu olduğunu saptamışlardır. Fiber içeriğinin artmasıyla saf kilin, basınç ve çekme dayanımının ve sertlik indeksinin arttığını ve bu durumun özellikle düşük su muhtevalarında daha etkili olduğunu saptamışlardır. Fiber uzunluğunun artmasıyla fiberin pik basınç dayanımı ve çekme dayanımına olan etkisi azalırken süneklik üzerine olan etkisi artmaktadır. Fiber katkısı kompozitin hidrolik geçirgenliği artırmakta özellikle yüksek su muhtevalarında daha da belirgin arttırmaktadır. Hidrolik iletkenlikteki bu artmaya rağmen kompozitin hidrolik geçirgenliği toprak dolgu uygulamaları için hala yeterince düşük seviyelerde olduğu görülmüştür.

Al Wahab ve El-Kedrah ⁽⁷⁾ (1995) killi zeminlerin çekme çatlakları ve büzülme/şişmenin azaltılmasında polipropilen fiberlerin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Düşük permabiliteye sahip olması kil tabakaları için önemli bir

gereksinim olmasına karşın şişme özelliği olmayan siltli killi zeminden elde edilen bulgulara göre fiber içeriğinin artmasıyla birlikte permeabilite de artma eğilimi göstermektedir.

Vallejo and Yoo ⁽⁸⁾ (1995) kısa çelik fiberlerin fisürlü killerin kesme dayanımını arttırıp arttırmadığını anlamak için hem deneysel çalışma hem de teorik analizler yapmışlardır. Laboratuar deneyleri fiberle güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş kil örneklerinin direkt kesme deneyleri yürütmüşler. Teorik analizler için ise mevcut çatlakların fisürlü killerde ilerleme yönünü doğrusal elastik kırılma mekaniği teorilerine dayandırmışlardır. Araştırma sonucunda fisürlü killere kısa çelik fiberler eklenmesi durumunda kesme dayanımlarının arttığını göstermiştir. Fiber katkısı çatlakların yatay düzlemde mevcut olduğu kil numunelerinin kesme dayanımını %9 arttırırken çatlakların yatayla 30 derece olduğu kil numunelerinin kesme dayanımını ise %25 arttırdığı görülmüştür.

Nataraj ve McManis ⁽⁹⁾ (1997) rasgele dağıtılmış fiberlerle güçlendirilen kil ve kum zeminlerin sıkışma, direkt kesme, tek eksenli basınç dayanımı ve CBR (Kaliforniya Taşıma Oranı) gibi bazı mühendislik özelliklerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçları fiberlerin kil ve kumun pik basınç dayanımlarının etkili bir şekilde arttırdığını göstermiştir. Ayrıca, fiber katkısının kil ve kum numunelerinin pik içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerini de kayda değer biçimde arttırmıştır. Mukavemetteki artışı fiber içeriği ve su muhtevasının bir fonksiyonu olarak yorumlamışlardır. Kil numuneler için Mohr-Columb yenilme zarfının doğrusal ve doğrusal olmayan kesitlerin birleşiminden oluştuğunu belirlemişlerdir. Hem kil hem de kum numunelerinin CBR değerleri fiber katkısı ile önemli bir şekilde artmıştır. Sonuç olarak deneyde kullanılan zeminler için optimum 25 mm boyunda fiberler

kullanılması ve karışımdaki fiber içeriğinin de zeminin kuru birim ağırlığının yaklaşık %0.3 kadar olmasını önermişlerdir.

Puppala ve Musenda ⁽¹⁰⁾ (2000) deneysel çalışmalarında polipropilen fiber katkısının şişebilen zeminlerin stabilitesine olan etkisini araştırmışlardır. Deney programında 2 farklı şişebilen zemin türü, 2 değişik tip fiber (%0.0-0.9 aralığına 4 farklı fiber oranıyla) kullanarak hazırladıkları katkısız ve fiber katkılı zemin numuneleri üzerinde tek eksenli basınç, hacimsel rötre, üçeksenli serbest şişme ve şişme basıncı deneyleri yürütmüşlerdir. Şişen killerin dayanım, şişme ve rötre karakteristikleri üzerine fiber katkısının etkisi istatistiksel olarak analiz etmişlerdir. Sonuç olarak fiber katkısının tek eksenli basınç dayanımını artırdığını, hacimsel rötre ve şişme basıncını azalttığını göstermiştir.

Iasbik vd. ⁽¹¹⁾ (2002) çalışmalarında killi zemin ve polipropilen fiber karışımlarının geoteknik karakteristiklerini incelemişlerdir. Deney bulgularından kompozitin (kil - fiber) mekanik özelliklerinin fiber içeriği ve fiber uzunluğuna bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Fiber katkısının zeminin tek eksenli basınç dayanımını arttırdığını bulmuşlardır. Fiber eklentisi zeminin rezilyans modülünün (resilient modulus) kayda değer derecede düşürdüğünü dolayısıyla fiber kullanılarak elde edilen kompozitin yol mühendisliği uygulamalarında kullanılmasının yararlı olacağı sonucuna varmışlardır.

Ang ve Erik ⁽¹²⁾ (2003) bir dizi tek eksenli basınç laboratuvar deneyleri yaparak sıkıştırılmış siltli killerin fiberle güçlendirmesinde numune boyutunun dayanım ve gerilme-birim deformasyon özelliklerine tesirinin hangi boyutlarda olacağını araştırmışlardır. Deney sonuçları numune boyutlarının ölçülen dayanımın büyüklüğünü önemli derecede etkilediğini ortaya çıkarmıştır. Optimum su içeriğinin

kuru tarafında sıkıştırılan numunelerde boyut etkisi daha belirgin olmaktadır. Deney verileri fiberle güçlendirilmiş zemin numunelerinin 70 mm den daha büyük çapta olması durumunda dayanımın daha doğru bir şekilde temsil edilebileceğini göstermiştir.

Gosavi vd. ⁽¹³⁾, (2004) yerel bir zemini rasgele dokumalı geotekstil ve cam elyaf ile güçlendirerek karışımların mukavemet davranışlarını incelemiştir. Deney bulgularına göre, yerel zemine bu fiberlerden %2 katılması durumunda kohezyon değeri artarken içsel sürtünme açısı çok az düşmüştür. İçsel sürtünme açısı değerinde azalma, kohezyon ve kayma değerinde artma olduğunu göstermiştir. Diğer yandan fiber katısının %3 olması durumunda eğilim tersine döndüğü ve fiber katısının zeminin CBR değerini de kayda değer oranda arttırdığı görülmüştür.

Kumar vd. ⁽¹⁴⁾, (2006) çalışmalarında polyester fiberleri yumuşak kil zeminlerle karıştırarak tek eksenli basınç dayanım artışlarını araştırmıştır. Ağırlıkça %0, %0.5, %1.0, %1.5 ve % 2.0 oranlarda düz ve kıvrıkcık fiberlerle hazırlanan numunelerin tek eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları, sıkıştırma düzeyinin fiber içeriğinin zemin üzerine olan katkısını göreceli olarak etkilediğini ortaya koymuştur. Fiber katkısı ile kilin tek eksenli basınç dayanımının arttığı ve fiberin kil-kum karışımına katılması durumunda daha çok dayanım artışı gözlemiştir. Her ne kadar yürütülen deneylerde fiberler numune içerisinde rasgele dağıtılmış olsa bile, deney sonuçlarının makul doğrulukta tekrarlanabilir olduğunu ifade etmişlerdir.

Ozkul ve Baykal ⁽¹⁵⁾ (2006) çalışmalarında killerin süneklik, sertlik ve çekme çatlaklarına karşı dirençlerinin kısa fiberler ile iyileştirilebildiğini göstermiştir. Çalışmalarında lastik talaşından üretilen fiberler ile güçlendirilen killerin sıkışma ve kesme dayanımı davranışlarını incelemiştir. Düşük plastisiteli saf kil ve ağırlıkça

%10 lastik talaş fiber katkısı içeren karışımları standart ve modifiye Proctor sıkıştırma enerjileri ile hazırlamışlardır. Kil ve kompozit zeminin (Kil - lastik talaş fiber) drenajlı ve drenajsız dayanımları direkt kesme deneyi kullanılarak bulunmuştur. Lastik talaş fiber içeriğiyle veya sıkıştırma enerjisini yükseltilmesiyle kilin drenajlı kesme dayanımının değişmediği gözlemlenmiştir. Diğer yandan standart sıkıştırma enerjisiyle sıkıştırılması durumunda drenajsız dayanımının değişmediği fakat modifiye sıkıştırma enerjisi ile hazırlanan numunelerin drenajsız kayma dayanımının çok az düştüğü ve daha çok süneklik kopması gösterdiği görülmüştür. Ayrıca, su içeriğinin kilin plastik limitinden daha az olması durumunda iyi bir sıkışmanın mümkün olmadığını gözlemlemişlerdir.

Cai vd. ⁽¹⁶⁾ (2006) polipropilen fiber ve kireç katkılarının, killi zeminlerin mühendislik özelliklerine olan etkisini araştırmıştır. Çalışmalarında 3 değişik oranda fiber (%0.05, %0.15 ve %0.25) ve 3 değişik kireç oranında (%2, %5 ve %8) kullanmıştır. Karışımların tek eksenli basınç, direkt kesme, şişme ve çekme deneylerine tabi tutmuştur. Karışımdaki fiber içeriğinin artması dayanımı ve büzülmeyi arttırırken şişme potansiyelini azaltmaktadır.

Kim vd. ⁽¹⁷⁾, (2007) değişik doğal fiberlerin örneğin Hindistan cevizi fiberi, pirinç kamışı ve Hint kenevirinden elde edilen fiberlerin, saha uygulamalarında kullanılabilirliğini araştırmıştır. Deney sonuçlarından doğal fiberlerin çekme dayanımlarının başarılı oldukları bulunmuştur. Yazarlar doğal fiber güçlendirmesinin uzun süreli çekme dayanımı değişikliklerini deniz suyu ve killi zeminler için çalışılmıştır. Deney sonuçları, doğal fiberlerin, deniz suyu ve killi zeminlerde aktif bozulmalara uğradığını göstermiştir.

Akbulut vd. ⁽¹⁸⁾, (2007) çalışmalarında rasgele dağıtılmış fiberlerin granüle zeminler ve killi zeminler üzerine etkileri araştırmıştır. Deneysel çalışmalarında araba lastiği parçaları, polietilen ve polipropilen fiber gibi atık malzemelerin killi zeminlerin iyileştirilmesinde başarıyla kullanılabilceği sonucuna varmıştır.

Rafalko vd. ⁽¹⁹⁾, (2007) kısa ve uzun fiberlerin kimyasal stabilizatörlü veya stabilizatörsüz olarak kilin dayanımına olan etkisini araştırmıştır. Laboratuvar deney sonuçlarına göre uzun fiberlerin tek başına kullanılması durumunda (kimyasal stabilizatör kullanmadan) kilin sertliği ve dayanımı en yüksek seviyede olmaktadır. Diğer yandan, fiberin yanı sıra kimyasal stabilizatör de kullanılması durumunda kısa fiberli kilin sertliğini en yüksek oranda arttırdığı fakat dayanım artışının çok az olduğunu göstermiştir. %1 den daha fazla dozajdaki fiber, etkinliği artırırken karıştırma işlemini zorlaştırmaktadır. Fiberler ve kil mineralleri arasındaki hidrojen bağları yüzünden polivinil alkol bazlı fiberlerin diğer fiberlere göre daha yüksek bir performans göstermesi beklenirken, bu fiberlerde diğer fiberler ile aynı performansı göstermiştir.

Babu ve Vasudevan ⁽²⁰⁾ (2008) Hindistan cevizi lifi ile güçlendirilmiş zeminlerin dayanım ve rijitlik davranışlarını araştırmıştır. Çalışmalarında, katkısız ve değişik oranlarda Hindistan cevizi lifi karıştırılarak hazırladıkları katkılı silindirik numuneleri üç eksenli kesme aletinde deneye tabi tutmuşlardır. Deney bulgularına dayanarak kum-kil karışımının ağırlıkça %1.0-2.0 Hindistan cevizi lifi katkısı eklenmesiyle dayanım ve rijitliğin arttığı saptanmıştır.

Naeini ve Sadjadi ⁽²¹⁾ (2008) çalışmalarında atık polimer materyallerini güçlendirme materyalleri olarak kullanmıştır. Saf zemin ağırlığının değişik plastisite indekslerine sahip zeminlere ağırlıkça %0 ile %4 aralığında atık polimerden üretilen

fiber katarak hazırlanan doygun olmayan killi zeminlerin dayanım davranışlarını direkt kesme deney düzeneği kullanarak araştırmıştır. Sonuç olarak atık fiber katkısının zeminlerin mukavemet parametrelerinde önemli artışlar oluşturduğunu ve fiber içeriğinin artmasıyla dayanımın da artığını ortaya koymuştur.

Kalhor ⁽²²⁾ (2008) alışmasında metal fiberlerle güçlendirilmiş saf kili iki farklı su içeriğinde hazırlayarak eksensel basınç deneyleri yürütmüştür. Sonuç olarak metal fiberlerin rasgele dağıtılmasının, saf kilin eksensel basınç dayanımını artırdığını göstermiştir. Dayanım artışını fiber uzunluğuna, aspect oranına (fiberin boyunun çapına oranı), eğilme (bend) açısına ve fiberlerin karışım içindeki ağırlıkça yüzdelerine bağlamıştır. Açılı metal fiberler düz fiberlere nazaran eğilme dayanımı daha fazla etkilemektedir. Ayrıca su muhtevası artışının da eksensel dayanımı azalttığını söylemektedir.

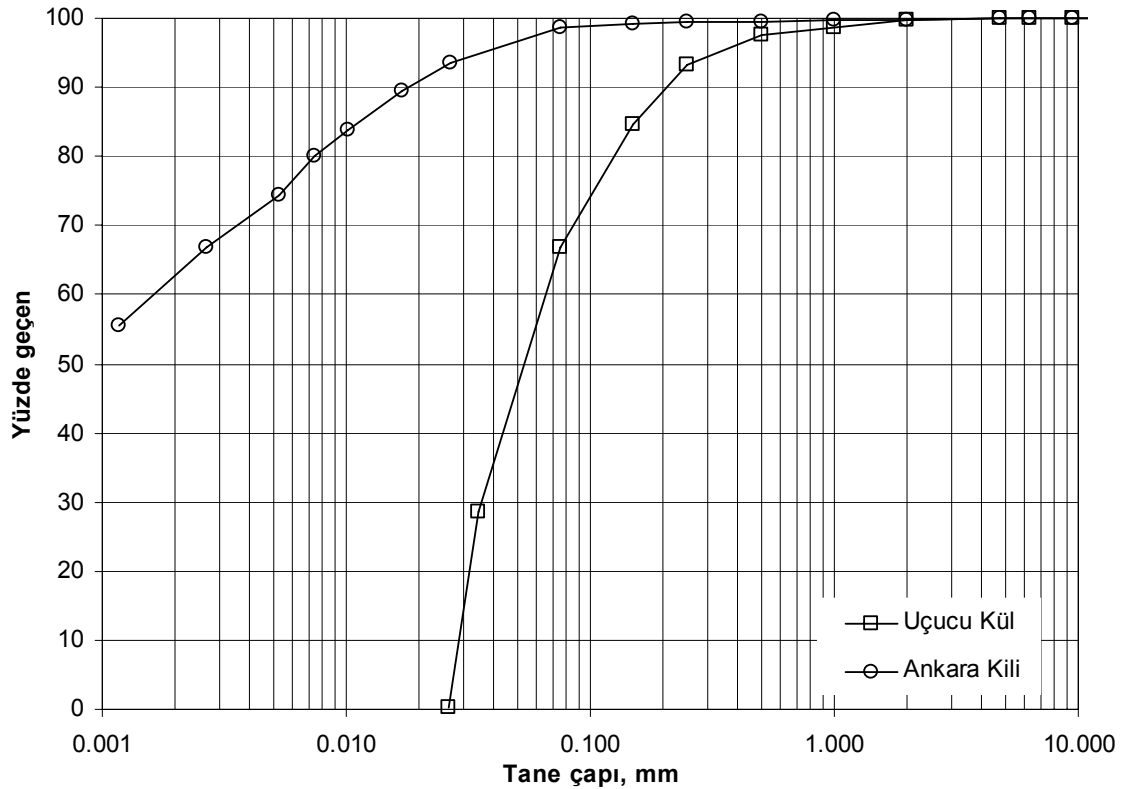
Bu deneysel çalışmada; Ankara kiline değişik oranlarda uçucu kül, farklı ebat ve türlerde polipropilen fiberler katılarak elde edilen karışımların, tek eksenli basınç dayanımlarının nasıl değiştiği araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Ankara ilinin Çukurambar semtindeki bir araştırma çukurundan kil temin edilmiştir. Yine Ankara'nın Nallıhan ilçesindeki Çayırhan Termik Santralinden deneyler için kullanılacak uçucu kül getirilmiştir. Uçucu kül ve kilin, eleme ve hidrometre metotları kullanılarak tane boyutu dağılım eğrileri çıkarılmıştır. Deneylerde kullanılacak kil ve uçucu külün sınıflandırma deneyleri yürütülmüştür. Daha sonra uçucu kül ve kilin özgül ağırlıkları saptanmıştır. Uçucu kül-kil karışımlarının kompaksiyon deneyleri yürütülmüştür. Ankara kilinin kompaksiyon karakteristikleri tek başına ve üç farklı uçucu kül içeriğinde (uçucu külün kile oranı kuru ağırlıkça % 10.0, % 20.0 ve % 30.0) standart Proctor kompaksiyon enerjisi ile elde edilmiştir. Kompaksiyon deneylerinden elde edilen optimum su muhtevası-maksimum kuru birim hacim ağırlık verileri, tek eksenli basınç deneylerinde kullanılacak su muhtevasını belirlemiştir. Optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılan uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç deneyleri 1 gün, 7 gün, 14 gün ve 28 gün kür ortamında bekletildikten sonra yürütülmüştür. Ayrıca, uçucu kül-kil karışımlarına iki farklı fiber tipi (M ve F tipi) ve bu fiber tiplerinin de değişik boyutları (6 mm ve 19 mm) eklenerek 28 gün kür ortamında bekletildikten sonra tek eksenli basınç dayanımları elde edilmiştir. Fiberin karışım içindeki oranı % 0.5 ve % 1.0 olarak seçilmiştir. Deneylerden elde edilen bulgulara bundan sonraki bölümlerde değinilecektir.

2.1. Çalışmada Kullanılan Kil ve Uçucu Kül

Çalışmada kullanılan kil ve uçucu külün tane boyutu dağılım eğrileri (Şekil 2.1.), kıvam limitleri ve özgül ağırlıkları sırasıyla ASTM D 422, ASTM D 4318 ve ASTM D 854 standartlarına ⁽²³⁻²⁵⁾ göre elde edilmiştir. Deney sonuçları Çizelge 2.1.'de özetlenmiştir.



Şekil 2.1. Çalışmada kullanılan kil ve uçucu külün tane boyutu dağılım eğrileri

Birleşik zemin sınıflama sistemine ASTM D 2487 standardına ⁽²⁶⁾ göre kilin sınıfı CH olarak belirlenmiştir. Ayrıca birleşik zemin sınıflama sistemine ASTM D 2487 standardına ⁽²⁶⁾ göre uçucu külün kötü derecelenmiş olduğu ve NP olarak sınıflandırılmıştır (Çizelge 2.1.).

Çizelge 2.1. Çalışmada kullanılan kil ve uçucu külün bazı fiziksel özellikleri

Özellik	Uçucu Kül	Kil
Üniformluk katsayısı, $C_u = D_{60}/D_{10}$	2.17	-
Eğrilik katsayısı, $C_c = (D_{30} \times D_{30})/(D_{60} \times D_{10})$	0.67	-
Likit Limit, LL (%)	-	97
Plastik Limit, PL (%)	-	28
Özgül ağırlık, G_s	2.553	2.721
Birleşik Zemin Sınıflama Sistemine (USCS) göre sınıfı	NP	CH

2.1.1. Çayırhan Termik Santrali Uçucu Külünün Özellikleri

Çayırhan Termik Santrali külü camsı ve kristalize fazlardan oluşmuştur. Kristalize fazlar alkali feldspatlar, kuvars, hematit, anhidrit ve mullitten meydana gelir. Çayırhan uçucu külünün X- ışınları difraktogramında, camsı fazın 23-28° 2θ arasında maksimum duruma geldiği görülmüş dolayısıyla camsı fazın silissi karakter taşıdığı anlaşılmıştır.

Çayırhan uçucu külü, büyüklüğü 1-20 µm arasında değişen küresel, yarı-köşeli tanecikler içermektedir.

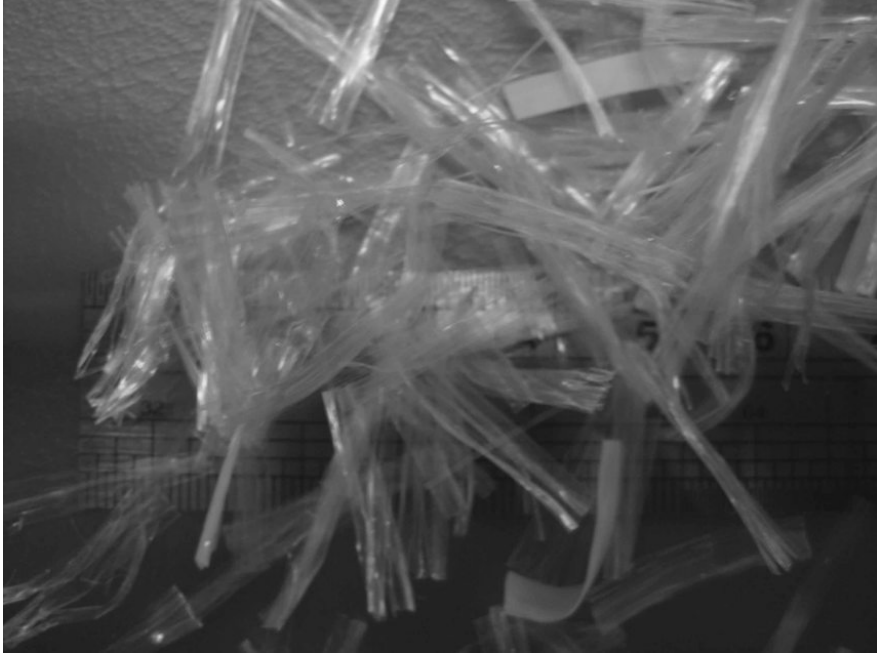
Çayırhan uçucu külü, reaktif kireç miktarının %10'un altında olması nedeniyle ASTM C 618 standartına ⁽²⁷⁾ göre V sınıfına (silissi uçucu kül) girmektedir. Yine ASTM C 618 standartına göre $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ değerinin %70'in üzerinde olması nedeniyle F sınıfına (düşük kireçli) dahil olmakla birlikte,

analitik CaO miktarının %10'un üzerinde olması nedeniyle kireçsi kül sınıfına da girmektedir.

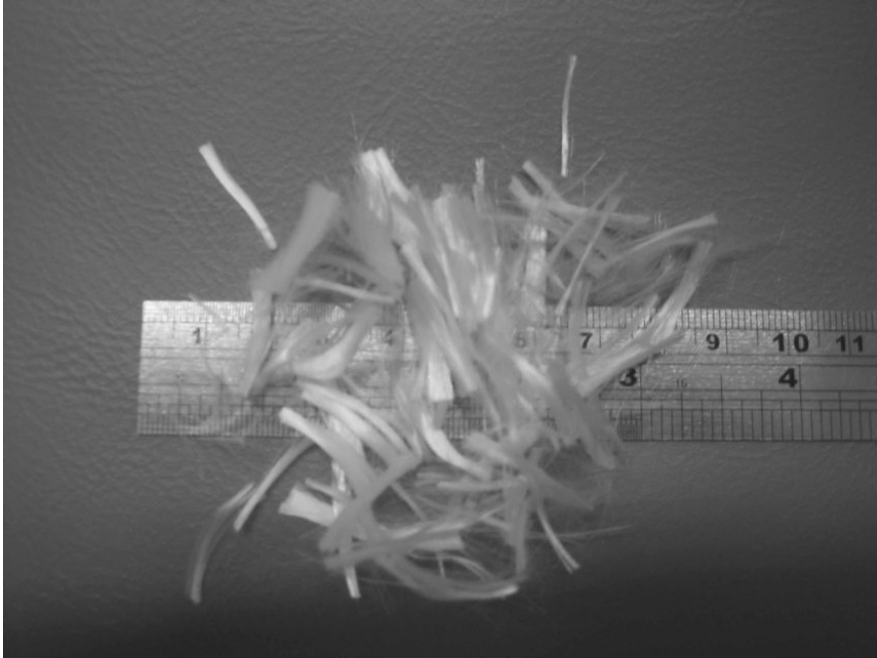
2.2. Çalışmada Kullanılan Polipropilen Fiberler

Polifiberler % 100 polipropilen esaslı olup, beton karışımlar içerisinde yıllardan beri kullanıla gelen bir mikro donatı çeşidi olarak birçok uygulamada karşımıza çıkan bir üründür. Polifiberler malzeme içerisine katılışları bakımından 2 tiptir. Bunlar F tipi ve M tipi polifiberlerdir. M tipi polifiberler görünüm olarak ince saç teline benzerler (Şekil 2.2.). F tipi polifiberler ise ağ görünümlü liflerdir (Şekil 2.3.).

Çalışmada, 6.0 mm ve 19.0 mm uzunluğunda F tipi, 6.0 mm ve 19.0 mm uzunluğunda M tipi polipropilen fiber (Şekil 2.2.ve Şekil 2.3.) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan ağ şekilli fiberin bazı fiziksel özellikleri Çizelge 2.2.'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Çalışmada kullanılan F tipi polipropilen fiber



Şekil 2.3. Çalışmada kullanılan M tipi polipropilen fiber

Çizelge 2.2. Çalışmada kullanılan fiberlerin bazı fiziksel özellikleri ⁽²⁸⁾.

Özellik	M tipi	F tipi
Tip	Multifilament	Fibrile
İçerik	% 100 saf polipropilen	% 100 saf polipropilen
Görünüş	Tel lifler	Ağ şekilli fiber
Çekme dayanımı (kPa)	700	400
Young modülü (kPa)	3500	2600
Uzama (%)	20 %	15 %
Yoğunluk (g/cm ³)	0.91	0.91
Renk	Transparan	Transparan
Asit etkisi	Duraylı	Duraylı
Biolojik dayanımı	Duraylı	Duraylı

2.3. Numune Sıkıştırma Aparatı

Tek eksenli basınç numuneleri özel olarak tasarlanmış bir sıkıştırma aparatı yardımıyla hazırlanmıştır. Sıkıştırma işleminde numunelerin kuru yoğunluğunun homojen olmasına dikkat edilmiş ve numune içerisinde istenmeyen lokal boşlukları minimize etmek için numuneler üç tabaka halinde sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma aparatı her bir tabakanın yüksekliğini 33.5 mm ve toplamda numune boyunu 100.5 mm ve çapını 50.0 mm oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Her bir tabaka sıkıştırılırken sıkıştırma tokmağı (taban çapı 49.50 mm) üzerindeki işaretli yerlerden tabaka yüksekliği dolayısıyla tabaka hacmi kontrol altında tutulur (tabaka taban alanı sıkıştırma moldu tarafından sabit tutulur). Ayrıca, sıkıştırma moldu boyuna iki eşit

parçaya ayrılabilir şekilde imal edilmiştir (Şekil 2.4.). Zira sıkıştırma işlemi sonrasında numuneyi iterek dışarı çıkarırken numune üzerinde istenmeyen kontrol dışı gerilmelerin oluşması kaçınılmazdır. Hâlbuki sıkıştırma moldu iki eşit parçaya kolaylıkla ayrılabilirdi için sıkıştırma işlemi sonrasında numuneyi sıkıştırma moldu içerisinden iterek çıkarmaya gerek kalmamaktadır.



(a)



(b)

Şekil 2.4. Mukavemet deney numunesi hazırlama aparatı, (a) numune sıkıştırmaya hazır hali, (b) tüm parçaların görünüşü

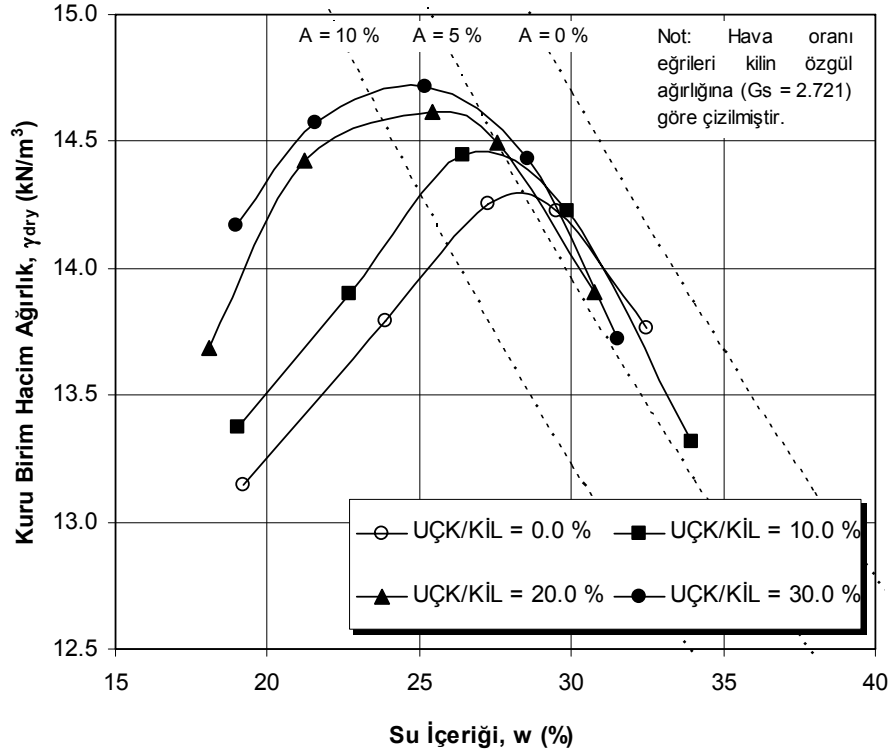
Sıkıştırma işleminde, önce numune için gereken kuru malzeme (fiber-uçucu kül - kil) ve su miktarları, standart Proctor deneylerinden elde edilen optimum su muhtevası, maksimum kuru yoğunluk ve her bir tabakanın hacmi (çap 50.0 mm yükseklik 33.5 mm) kullanılarak elde edilmiştir. Kuru malzeme ve su, homojen olarak karıştırıldıktan sonra suyun kil parçacıklarına iyice nüfuz etmesi amacıyla birkaç gün süre ile plastik torbalarda bekletilmiştir. Daha sonra her bir tabaka için

gereken karışım bir kürek yardımı ile sıkıştırma kalıbı içerisine boşatılmıştır. Sonra sıkıştırma tokmağı kalıp içerisine sokulmuş ve bir çekiç yardımıyla ilgili tabaka için tokmak üzerinde işaretlenmiş olan yere gelinceye kadar tokmaklanmıştır. Tüm tabakalar sıkıştırıldıktan sonra numune sıkıştırma kalıbı içerisinden çıkarılarak tek eksenli deneyine tabi tutulmuştur.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

3.1. Laboratuvar Kompaksiyon Karakteristikleri

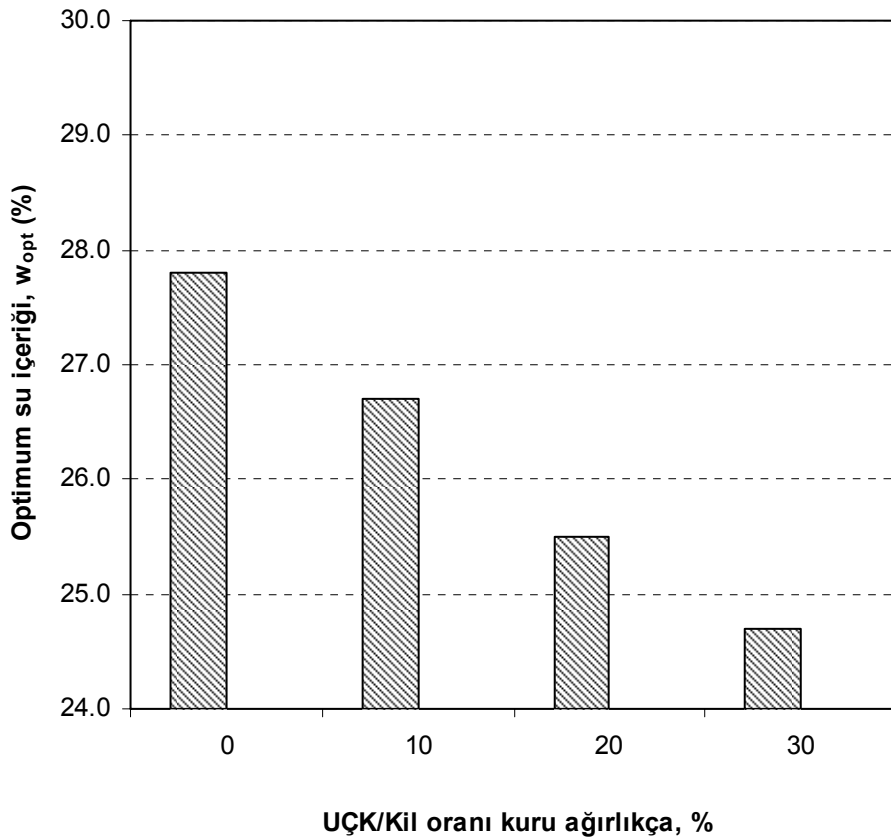
Değişik oranlarda uçucu kül-kil içeren karışımların maksimum kuru yoğunlukları ve optimum su içerikleri ASTM D 698 standardına ⁽²⁹⁾ göre elde edilmiştir. Deneylerde önceden belirlenen Uçucu kül/kil oranlarına göre uçucu kül ve kuru kil ağırlıkları tartılmıştır. Deney esnasında flokülasyonun en aza indirilmesi amacıyla karışımlara toplam kuru ağırlıklarının % 7'si kadar su ilave edilerek deneyden önce karışımlar birkaç gün ağzı kapalı plastik torbalarda bekletilmiştir. Daha sonra saf kilden başlanarak, kil içerisindeki uçucu kül oranı % 0, % 10, % 20 ve % 30 olacak şekilde yükseltilecek ve karışımların su içerikleri de kademeli olarak artırılarak standart Proctor kompaksiyon eğrileri elde edilmiştir (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Uçucu kül-kil karışımlarının standart Proctor kompaksiyon eğrileri

Her bir karışımın özgül ağırlığı farklı olduğu için her bir karışıma ait hava oranı çizgileri de farklı olacaktır. Fakat karışımların her birine ait hava oranı eğrilerinin Şekil 3.1. üzerinde gösterilmesi durumunda kompaksiyon eğrilerinin okunabilirliği azalacaktır. Dolayısıyla referans olması açısından sadece % 100 kilin üç ayrı hava oranına (% 0, % 5.0 ve % 10.0) ait olan eğrileri Şekil 3.1.' de çizilmiştir. Şekil 3.1. incelendiğinde optimum su içeriğinin tüm uçucu kül-kil karışımları için yaklaşık %5 hava oranı eğrisi civarında olduğu görülmektedir.

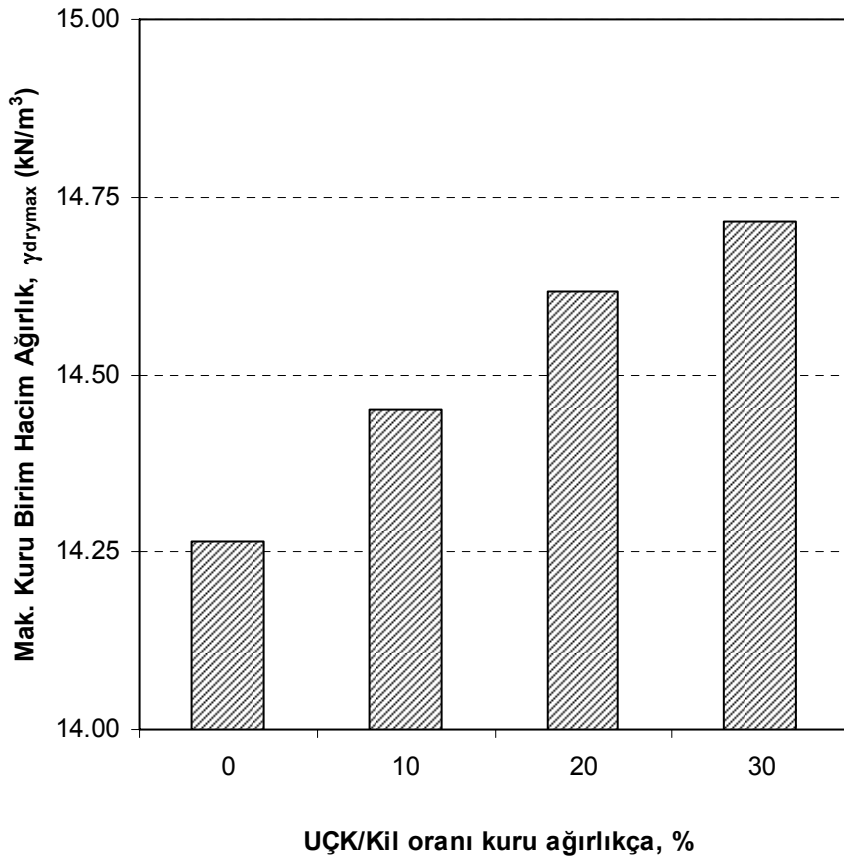
Karışımlardaki uçucu kül oranının artmasıyla optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında meydana gelen değişiklikler sırasıyla Şekil 3.2. ve Şekil 3.3. de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Uçucu kül-kil karışımlarının optimum su içeriklerinin karışımdaki UÇK oranı ile değişimi.

Şekil 3.2.'ye göre genel olarak karışımdaki uçucu kül oranı arttıkça optimum su içeriği de belirgin bir şekilde azalmaktadır. Bununla beraber Şekil 3.3.'de görüldüğü üzere karışımdaki uçucu kül oranı arttıkça maksimum birim hacim ağırlığı ise yükselen bir trend içindedir.

Buna göre uçucu kül içeriği optimum su muhtevasında, maksimum kuru birim hacim ağırlığı sağlamaktadır ve bu da kilin kompaksiyon karakteristiklerini olumlu yönde etkilemektedir.



Şekil 3.3. Uçucu kül-kil karışımlarının maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının karışımdaki UÇK oranı ile değişimi.

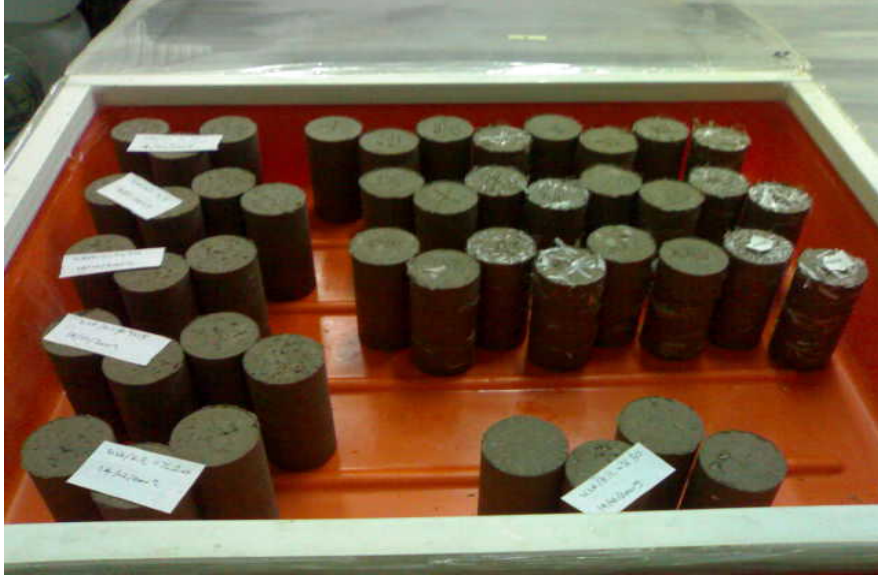
3.2. Tek Eksenli Basınç Deneyleri

50 mm çapında ve 100.5 mm boyunda hazırlanan fiber-kum-kil karışımlarının tek eksenli basınç deneyleri ASTM D 2166 standardına ⁽³⁰⁾ göre 0.5 mm/dak yükleme hızı altında deformasyon kontrollü olarak yürütülmüştür. Optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunlukta dinamik kompaksiyonla sıkıştırılarak hazırlanan numuneler 24 saat bekletildikten sonra tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Karışımların tek eksenli basınçları ile eksenel birim deformasyonları arasındaki ilişkiler devam eden bölümlerde gösterilmiştir.

3.2.1. Uçucu Kül Katkısı İle Gerçekleştirilen Tek Eksenli Basınç Deneyleri

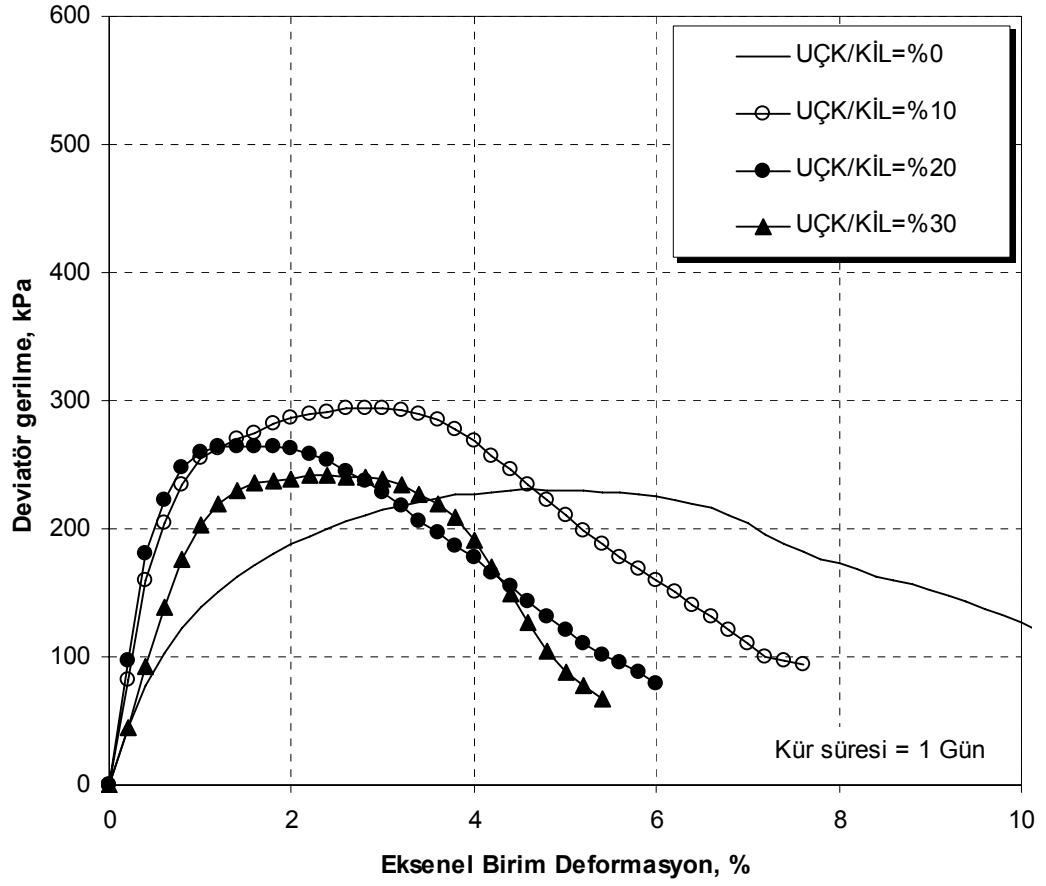
Tek eksenli basınç deneyleri ilk olarak, daha önceden belirlenen optimum su muhtevalarında, sadece uçucu kül katkısı ile yapılmıştır. Daha sonra uçucu kül katkısına ilaveten polipropilen fiberler de eklenmiştir ve bu iki güçlendirme katkısının kil numunelerinin mekanik özelliklerine olan etkileri araştırılmıştır.

Kr ortamında bekletilen numunelerin (şekil 3.4.), tek eksenli basınç dayanımının, zamanla değişimini gözlemek amacıyla, numuneler; hemen sonra, 1., 7., 14. ve 28. gün sonlarında 0.5 mm/dak.yükleme hızında tek eksenli basınç deneylerine tabi tutulmuşlardır. Karışımdaki uçucu kül oranları % 0, % 10, % 20 ve % 30 olacak şekilde ayarlanmıştır.

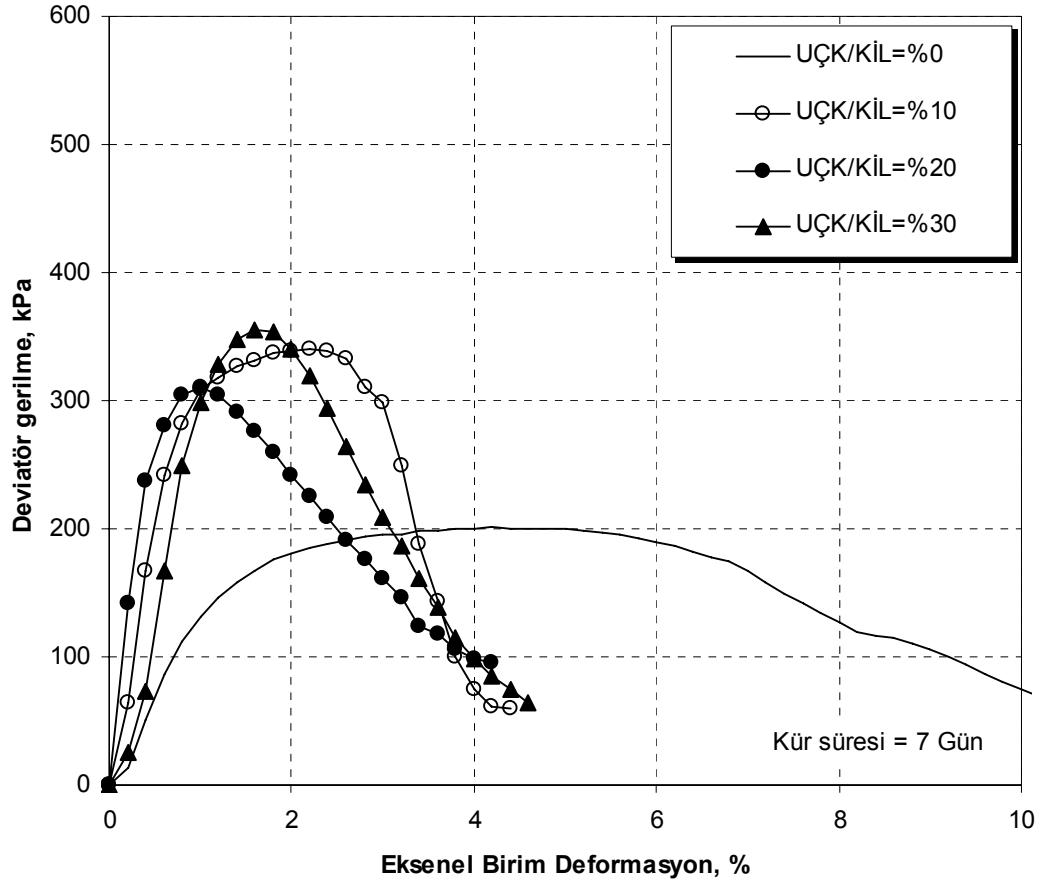


Şekil 3.4. Tek eksenli basınç deneyi için hazırlanmış numuneler.

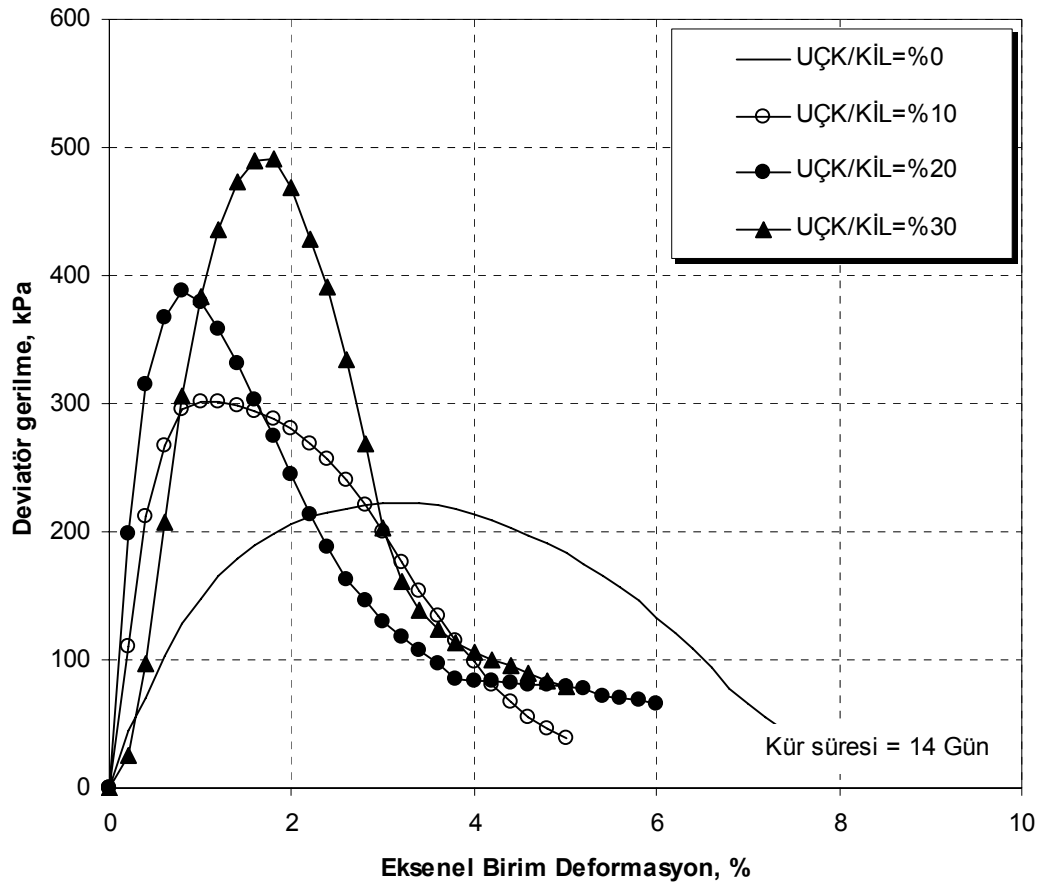
Numunelerin 1, 7, 14 ve 28 günlük tek eksenli basınç deneylerinden elde edilen gerilme-deformasyon eğrileri sırasıyla, Şekil 3.5, 3.6, 3.7. ve 3.8. de verilmiştir.



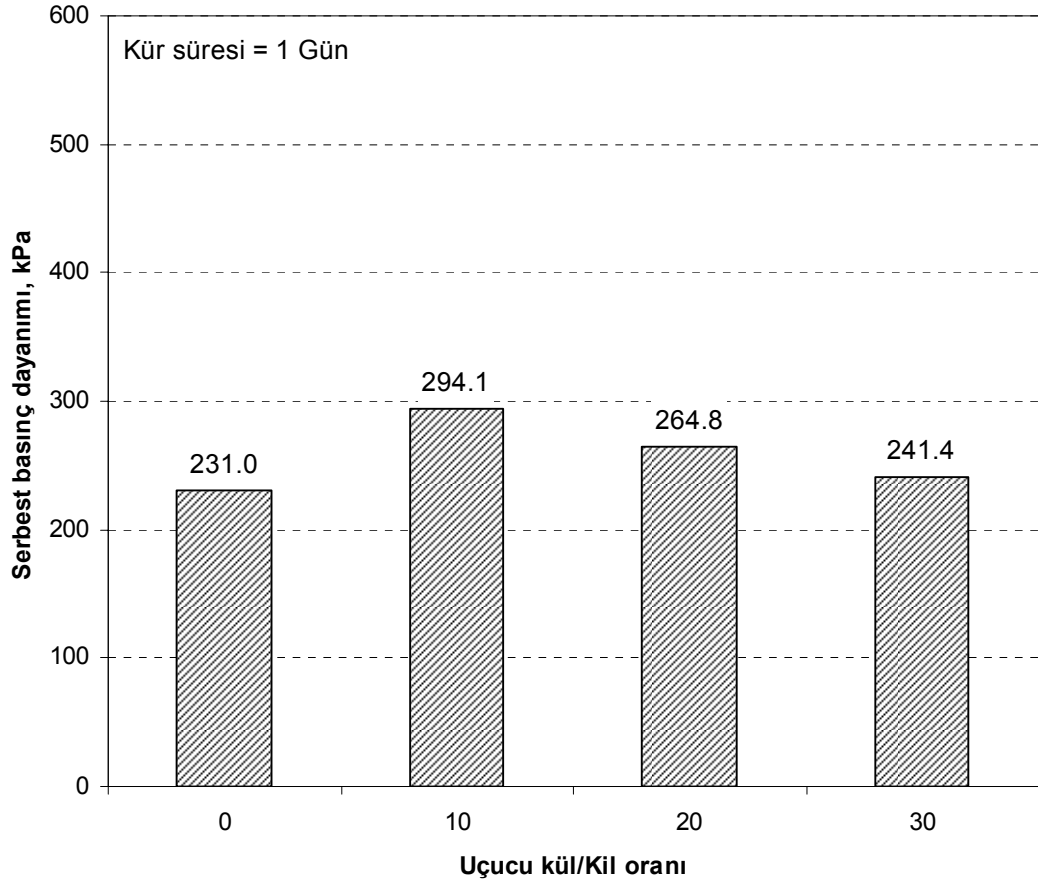
Şekil 3.5. 1 gün kürde bekletildikten sonra tek eksenli basınç deneyine tabi tutulan uçucu kül-kil karışımlarının deviator gerilme - eksenel birim deformasyon ilişkileri.



Şekil 3.6. 7 gün kürde bekletildikten sonra tek eksenli basınç deneyine tabi tutulan uçucu kül-kil karışımlarının deviator gerilme - eksenel birim deformasyon ilişkileri.

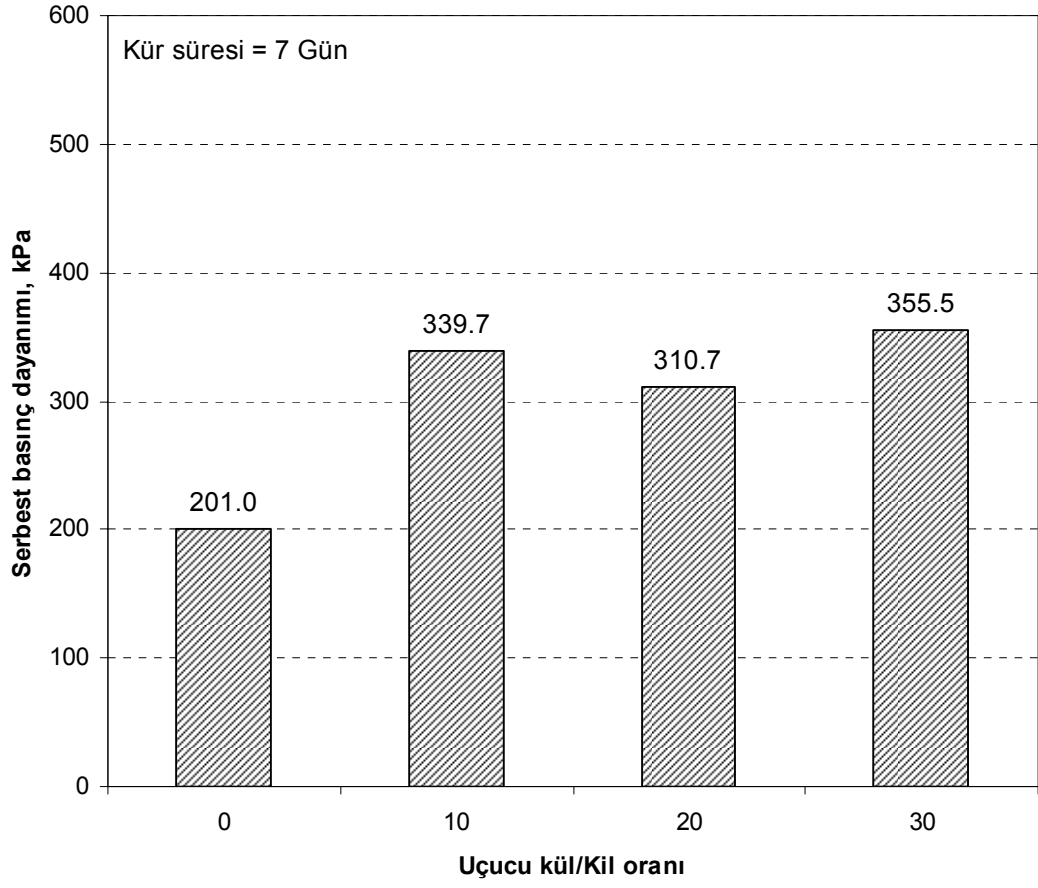


Şekil 3.7. 14 gün kürede bekletildikten sonra tek eksenli basınç deneyine tabi tutulan sonrasında uçucu kül-kil karışımlarının deviator gerilme - eksenel birim deformasyon ilişkileri.



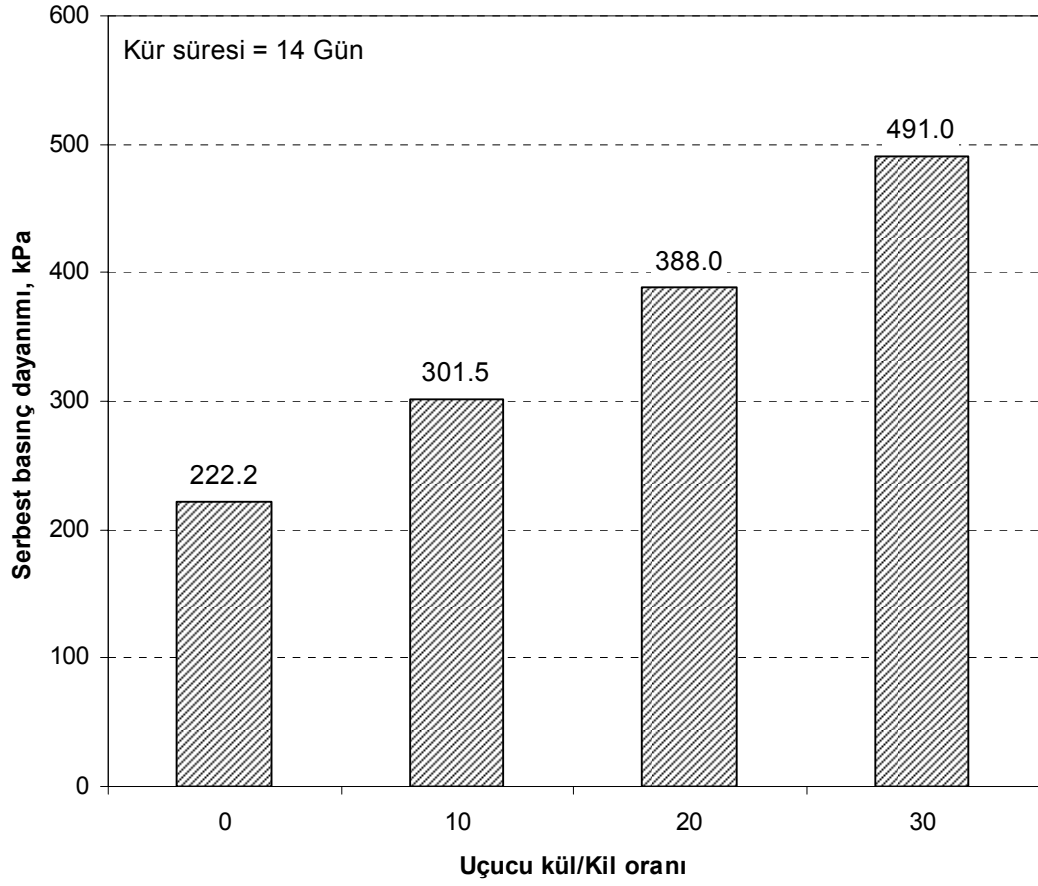
Şekil 3.9. 1 gün kürde bekletildikten sonra uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımlarının karışımdaki uçucu kül oranı ile değişimi.

Uçucu kül-kil karışımlarının 7. gün sonunda kürde bekletilen numunelerdeki tek eksenli basınç dayanımlarının daha da arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.10.). 7. gün sonunda en fazla dayanımın %30 uçucu kül içeren numunede olduğu görülmüştür. Bunu % 10 ve % 20 lik uçucu kül katkıları izlemektedir.



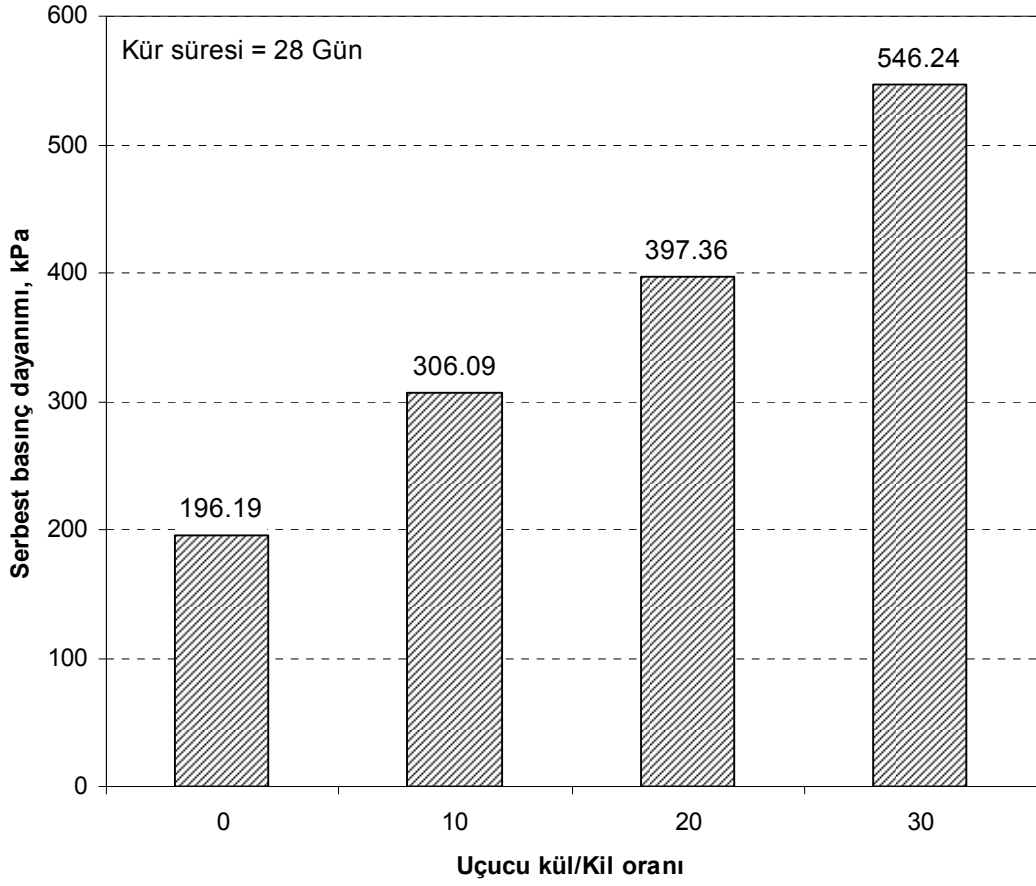
Şekil 3.10. 7 gün kürde beklendikten sonra uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımlarının karışımdaki uçucu kül oranı ile değişimi.

Uçucu kül-kil karışımlarının 14. gün sonunda (Şekil 3.11.) numunelerin tek eksenli basınç dayanımları doğrusal bir çizgide artmıştır. Saf kilin tek eksenli basınç dayanımı yine değişmezken, %10, %20 ve %30 uçucu kil katkılarının dayanımları sırasıyla, 301,5, 388 ve 491 kPa olmuştur. %30 uçucu kül içeren numunelerin dayanımları 1.gün de 241 kPa'dan, 14 gün sonunda sırasıyla şekil 3.11. ve Şekil 3.12. den görüleceği gibi, 491 ve 28 gün sonunda da 546 kPa'a çıkmaktadır. Buda uçucu kül katkısının karışımın tek eksenli basınç dayanımlarını açıkça artırdığını ortaya koymuştur.



Şekil 3.11. 14 gün kürde bekletildikten sonra uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımlarının karışımdaki uçucu kül oranı ile değişimi.

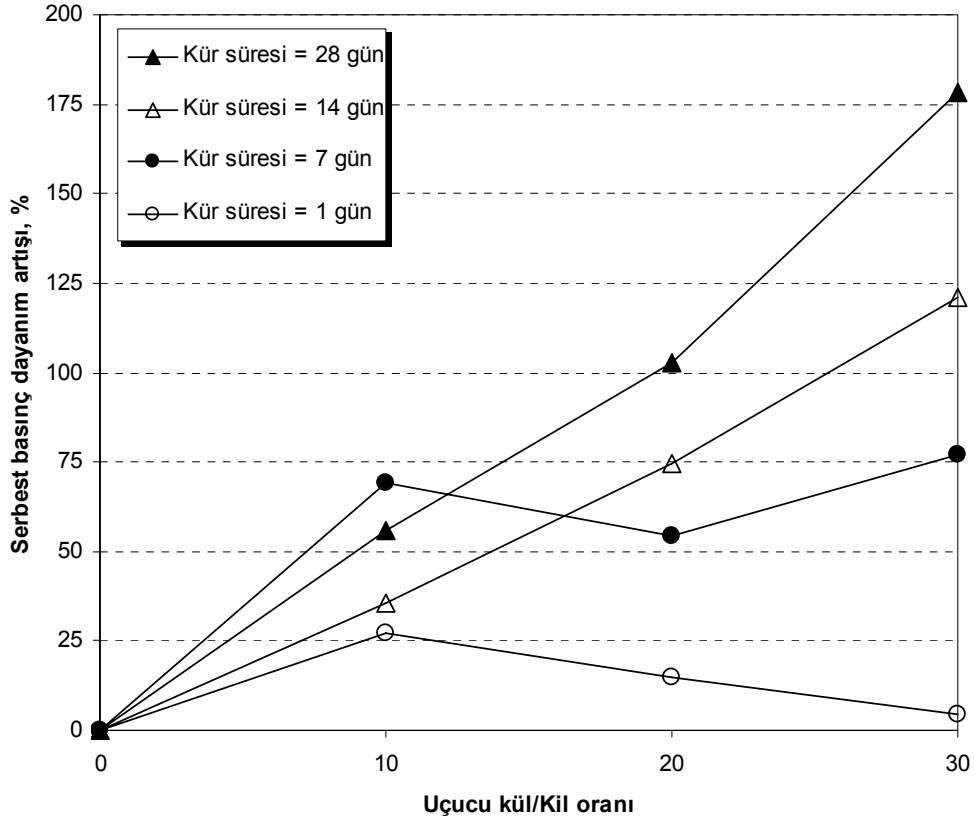
Son olarak uçucu kül-kil karışımlarının 28 günlük tek eksenli basınç dayanımları Şekil 3.12.' ye bakılarak incelenmiştir. Buradan da bir kez daha görüleceği gibi karışımdaki uçucu kül miktarı ve kür süresi uzadıkça, karışımın tek eksenli basınç dayanımı artmaktadır. Son olarak % 30 uçucu kül katkısıyla tek eksenli basınç dayanımının pik değerinin 546.24 kPa'a ulaştığı görülmektedir.



Şekil 3.12. 28 gün kürde bekletildikten sonra uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımlarının karışımdaki uçucu kül oranı ile değişimi.

Şekil 3.13.' deki grafikte uçucu kül- kil karışımlarının, kür sürelerinin artmasıyla birlikte tek eksenli basınç dayanımlarının nasıl değiştiği gösterilmiştir. 1. ve 7. gün sonlarında, karışımdaki uçucu kül miktarının artmasıyla birlikte tek eksenli basınç dayanımlarının, önce arttığı sonra da bir miktar düştüğü veya kararsız kaldığı gözlemlenmiştir. 1.günün sonunda %10 uçucu kül katkısıyla, tek eksenli basınç dayanımında %25'e varan bir artış gözlemlenmiş, fakat uçucu külün %30'lara varmasıyla bu artış düşmüştür. 14. günden sonra tek eksenli basınç dayanımı artışı

doğrusal bir çizgide ilerlemiştir. 14. gün sonunda %30 uçucu kül katkısının, tek eksenli basınç dayanımını % 120'ye yakın oranlarda artırdığı görülmüştür. Aynı şekilde 28 günlük tek eksenli basınç dayanımlarında da %55'lerden başlayarak % 180'lere varan tek eksenli basınç dayanımları gözlenmiştir.



Şekil 3.13. Her bir kür süresi için uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımlarının saf kilin tek eksenli basınç dayanımına nazaran yüzde artışı.

3.2.2. Uçucu Kül ve Polipropilen Fiber Katkısı ile Gerçekleştirilen Tek Eksenli Basınç Deneyleri

Bölüm 3.2.1. de gerçekleştirilen uçucu kül katkısı ile tek eksenli basınç dayanımı deneylerine bu bölümde polipropilen fiber katkısı da eklenmiştir ve tek eksenli basınç deneylerine devam edilmiştir. Karışıma eklenen fiberler, M tipi ve F tipi olmak üzere iki farklı tiptir. Ayrıca M tipi fiberlerde de 6 mm ve 19 mm, F tipi fiberlerde ise 6 ve 19 mm uzunluğundaki tipleri de karışıma ayrı ayrı eklenmiştir. Bu sayede hem fiber tipinin hem de fiber uzunluğunun uçucu kül-kil karışımının tek eksenli basınç dayanımlarına olan etkileri ayrı ayrı görülebilecektir. Fiberler uçucu kül-kil karışımlarına % 0.5 ve % 1.0 oranında eklenmiştir. Karışımındaki uçucu kül oranının % 0, % 10 ve % 30 olduğu durumlarda, fiber katkısının karışımın tek eksenli basınç dayanımlarına olan etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Tek eksenli basınç deneylerinde kullanılan numuneler 28 gün desikatörde bekletilmiş ve deneylere 28. gün sonunda başlanmıştır.



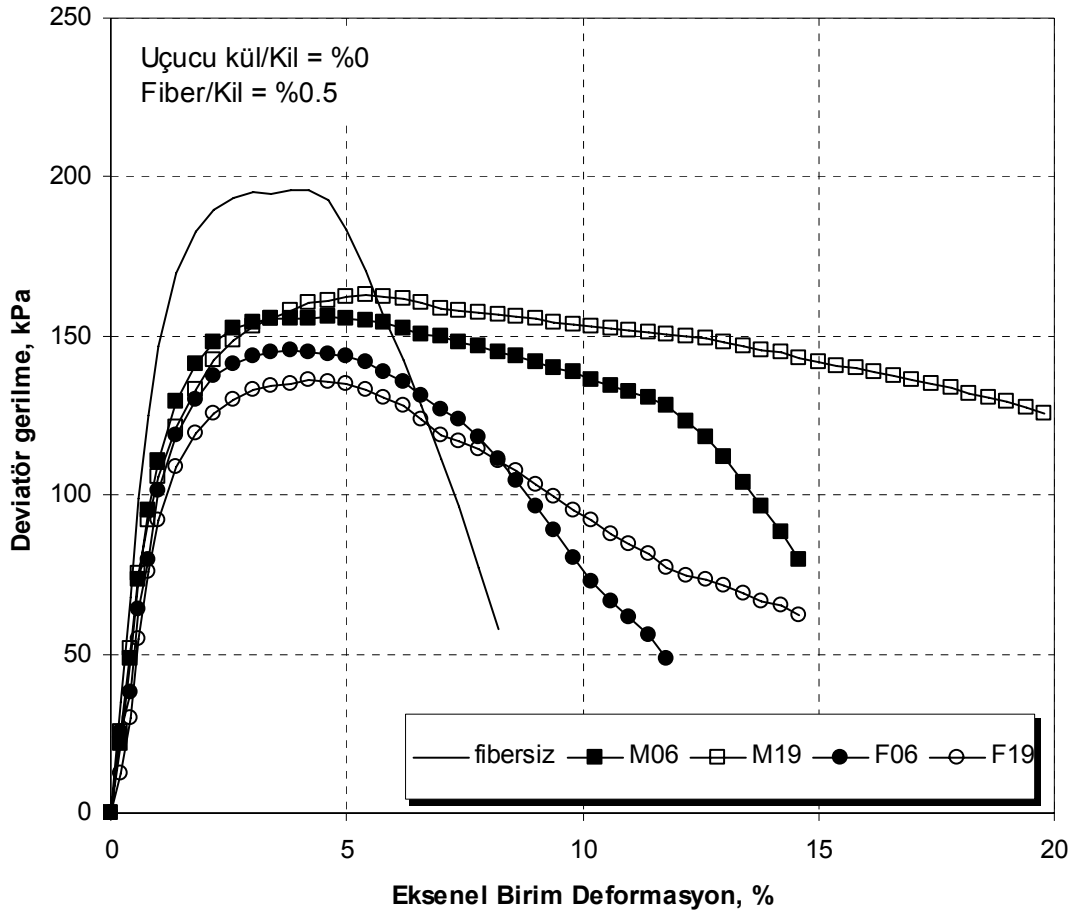
(a)



(b)

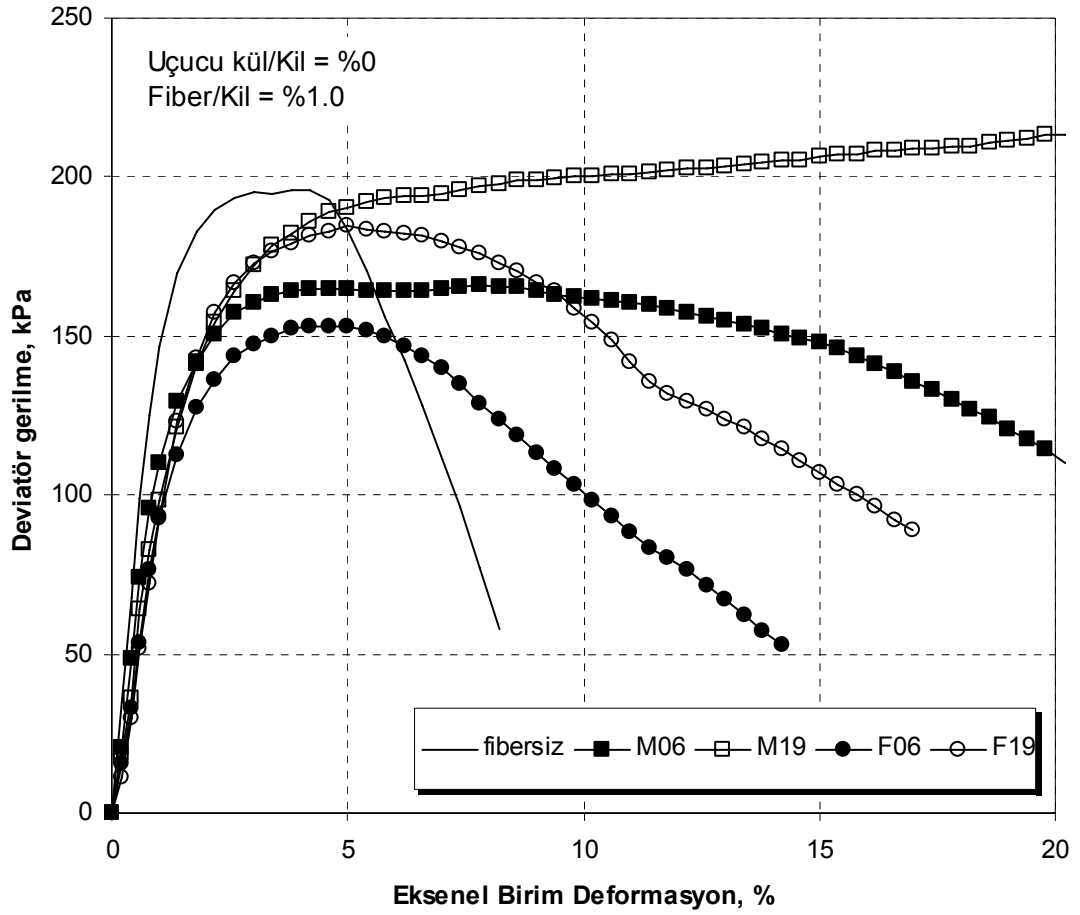
Şekil 3.14. Fiber katkısı ile hazırlanmış (a) deney numunesi ve (b) tek eksenli basınç deneyinde kırılmış deney numunesi

Şekil 3.15. de, 28 gün bekletilen numunelerin tek eksenli basınç dayanımları gösterilmiştir. Bu deneyde saf kile sadece fiber katkısı eklenmiştir yani uçucu kül katkısı yoktur. İki farklı fiber tipi M, F ve bunların M06 (6 mm), M19 (19 mm), F06 (6mm), F19 (19mm) boyutlarındaki çeşitleri saf kil ile karıştırılarak numuneler hazırlanmıştır. Şekil 3.15.' de görüldüğü üzere 28 gün sonunda saf kile ağırlığının %0.5' i kadar eklenen fiber katkıları tek eksenli basınç dayanımlarını düşürmektedir. Buna karşın fiber katkılarının eksenel birim deformasyonları artırdığı görülmüştür. M tipi polipropilen fiberlerin hem tek eksenli basınç dayanımlarının, hem de eksenel birim deformasyonlarının F tipi fiberlere oranla daha fazla olduğu saptanmıştır.



Şekil 3.15. 28 gün kürde bekletildikten sonra tek eksenli basınç deneyine tabi tutulan uçucu kül/kil oranı %0 ve fiber/kil oranı %0.5 olan fiber-uçucu kül-kil karışımlarının deviator gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkileri.

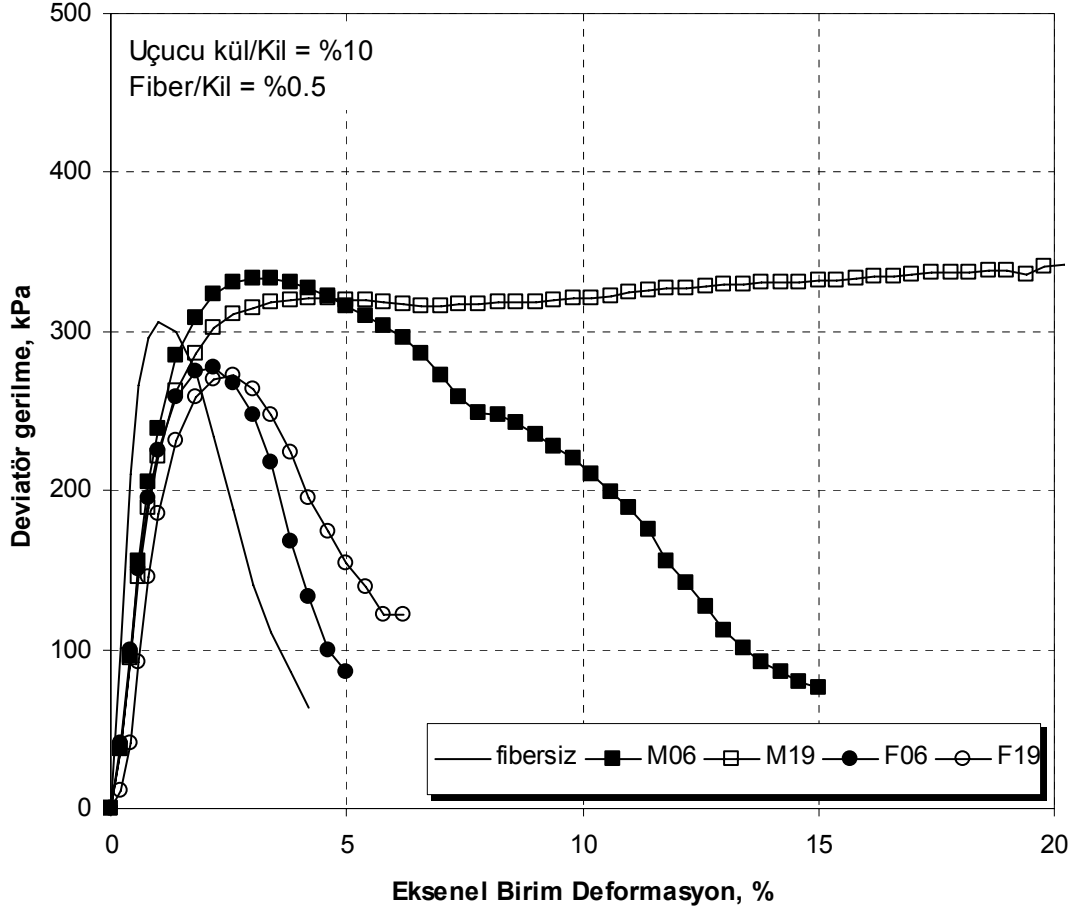
Şekil 3.16.' da fiber oranının %0.5 ten %1'e çıkarıldığını ve yine saf kile eklendiğini görmekteyiz. Burada göze çarpan nokta eksenel birim deformasyonların belirgin bir şekilde arttığı olmuştur. Tek eksenli basınç dayanımlarında ise gözle görülür bir değişme olmamıştır. Eksenel birim deformasyonlar % 20 ye ulaştığında deneye devam edilmemiştir. (Deney numunesinin boyu 100.5 mm'dir ve deformasyon 20 mm olur).



Şekil 3.16. 28 gün kürde bekletildikten sonra tek eksenli basınç deneyine tabi tutulan uçucu kül/kil oranı %0 ve fiber/kil oranı %1.0 olan fiber-uçucu kül-kil karışımlarının deviator gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkileri.

Şekil 3.17.' de bu kez uçucu kül-kil karışımına fiber katkısı eklenmiştir. Karışımdaki fiber içeriği oranı %0.5'dir. Uçucu kül, M tipi fiberlerle oluşturulan karışımın tek eksenli basınç dayanımını artırmıştır. Aynı şekilde fiber içeriği de eksenel birim deformasyonu artırmıştır. Fiber içeriğinin malzemeyi bir arada tutarak bir nevi sünekliğini artırdığını söyleyebiliriz. Şekil 3.17. deki grafiği incelediğimiz takdirde M tipi fiberlerin F tipi fiberlere oranla daha yüksek tek eksenli basınç

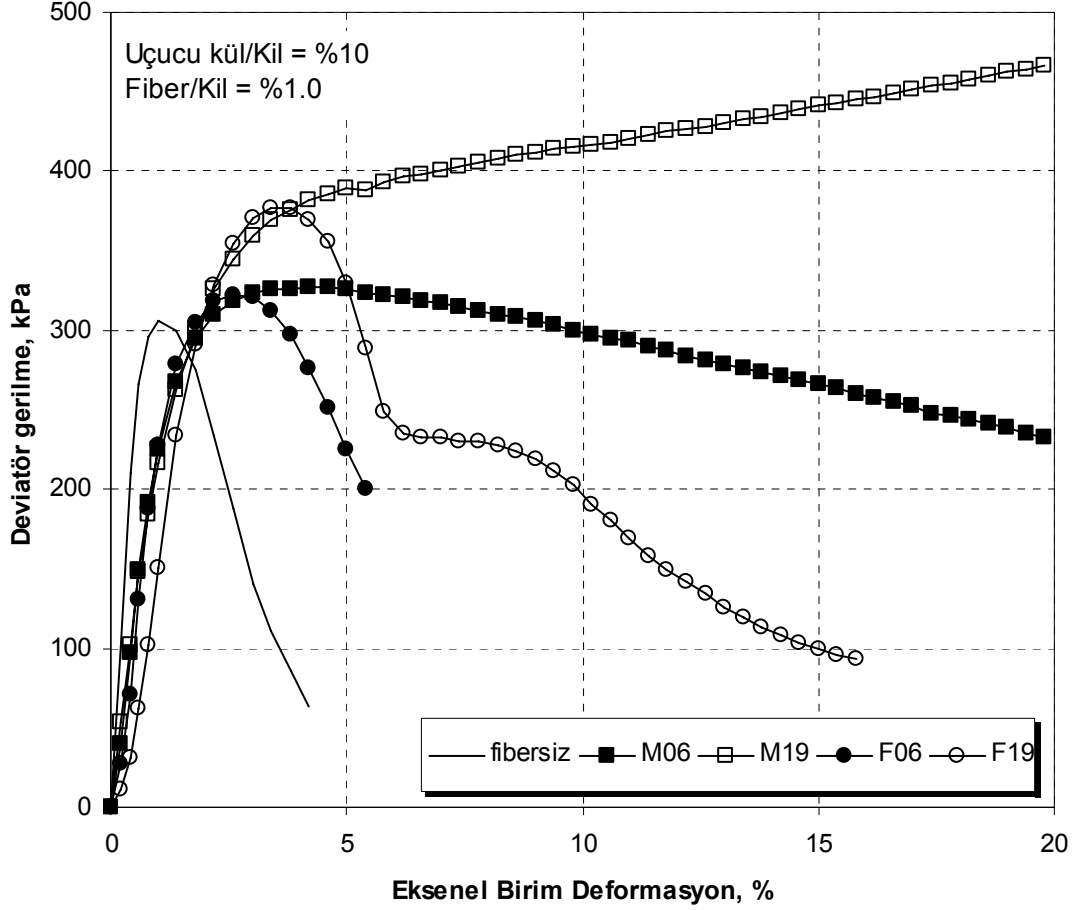
dayanımı ve aksel birim deformasyon yüzdelere sahip olduğunu da görebiliriz. Yine M tipi fiberler içerisinde M19 fiberinin M06 fiberine göre numunenin daha sünek özellik göstermesine sebep olduğunu görmekteyiz.



Şekil 3.17. 28 gün kürde bekletildikten sonra tek aksel basıncı deneyine tabi tutulan uçucu kül/kil oranı %10 ve fiber/kil oranı %0.5 olan fiber-uçucu kül-kil karışımlarının deviator gerilme-eksel birim deformasyon ilişkileri.

Fiber içeriğinin %1'e çıkarıldığı deney numunelerinde Şekil 3.18.) tek aksel basıncı dayanımlarının ve aksel birim deformasyonlarının daha da arttığı

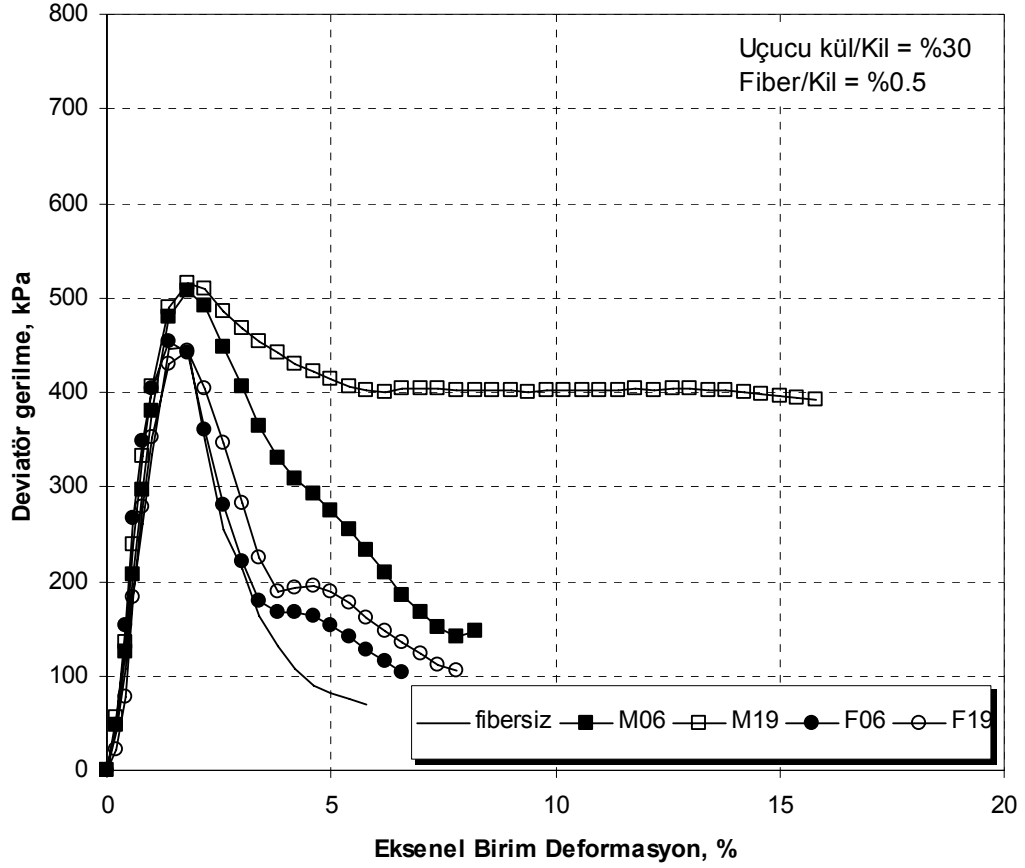
gözlemlenmiştir. Daha uzun boylu fiberler, daha yüksek dayanım ve daha yüksek birim deformasyon göstermektedir.



Şekil 3.18. 28 gün kürde bekletildikten sonra tek eksenli basınç deneyine tabi tutulan uçucu kül/kil oranı %10 ve fiber/kil oranı %1.0 olan fiber-uçucu kül-kil karışımlarının deviator gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkileri.

Daha önceki uçucu kül-kil karışımı numunelerinin tek eksenli basınç dayanımlarından gördüğümüz üzere uçucu kül katkısı tek eksenli basınç dayanımı artırmakta ve eksenle birim deformasyonlarını da düşürmektedir ve bunların pik değerleri de %30 oranında uçucu kül- kil karışımlarında gözükmemektedir. Şekil 3.19.'a

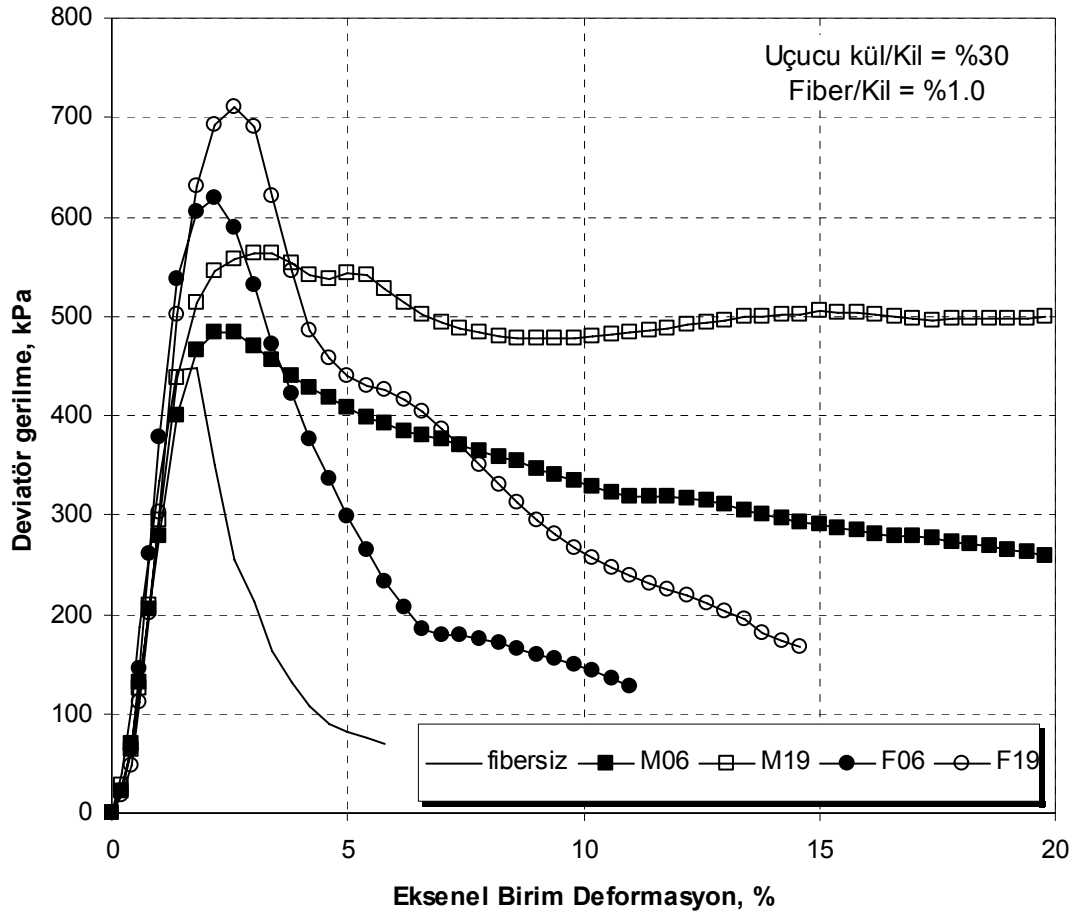
baktığımız takdirde uçucu kül etkisiyle tek eksenli basınç dayanımlarında fazla bir artışın olmadığı hatta F tipi fiberlerde azalmalar olduğu saptanmıştır. Bununla beraber fiber içeriğinin eksenel birim deformasyon üzerinde çok da etkili olmadığını da belirlenmiştir.



Şekil 3.19. 28 gün kürede bekletildikten sonra tek eksenli basınç deneyine tabi tutulan uçucu kül/kil oranı %30 ve fiber/kil oranı %0.5 olan fiber-uçucu kül-kil karışımlarının deviator gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkileri.

Şekil 3.20. deki grafikte bir önceki numunedeki gibi uçucu kül oranı % 30 olmaktadır fakat fiber katkısı %1'e çıkarılmıştır. Bu grafiği incelediğimiz zaman da

fiber oranının %1'e çıkması hem tek eksenli basınç dayanımlarını hem de eksenel birim deformasyonları tekrar artırdığı tespit edilmiştir. Burada %10 uçucu kül etkisiyle gerçekleştirilen deneylerden farklı olarak F tipi fiberlerin, M tipi fiberlere oranla tek eksenli basınç dayanımlarının daha yüksek olduğunu göstermiştir. Fakat eksenel deformasyonun yine M tipinde daha yüksek olduğunu söyleyebiliriz. Bunun sebebinin de M tipi fiberlerin yapısal olarak saç teli şeklinde olması ve uçucu kül-kil karışımına daha iyi bir şekilde karışmasıyla açıklanabilir (Şekil 3.21). Malzemeyle birlikte çok iyi aderans sağlayan M tipi fiberler numune kırıldıktan ve mukavemetini kaybettikten sonra, numunenin kendisini bırakmamasını ve bir arada durabilmesini sağlamakta bu da malzemenin eksenel birim deformasyonunu çok iyi bir şekilde artırmaktadır.

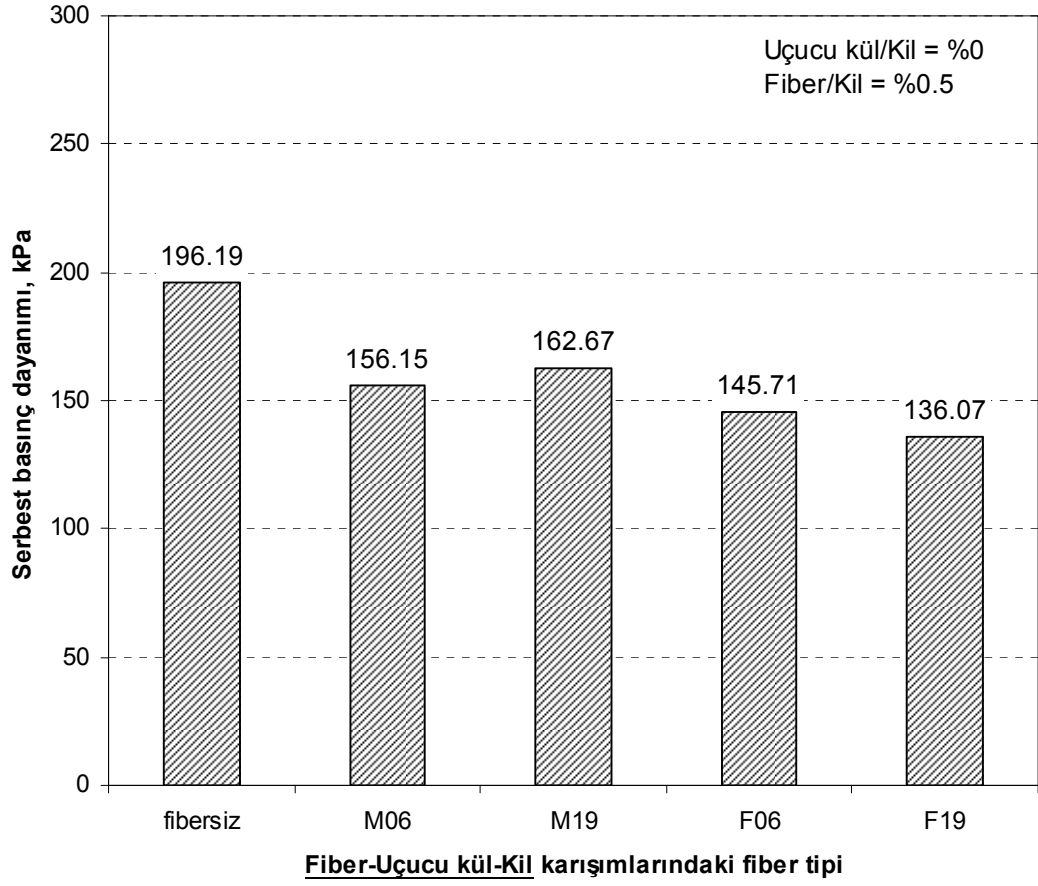


Şekil 3.20. 28 gün kürde bekletildikten sonra tek eksenli basınç deneyine tabi tutulan uçucu kül/kil oranı %30 ve fiber/kil oranı %1.0 olan fiber-uçucu kül-kil karışımlarının deviator gerilme-eksenel birim deformasyon ilişkileri.



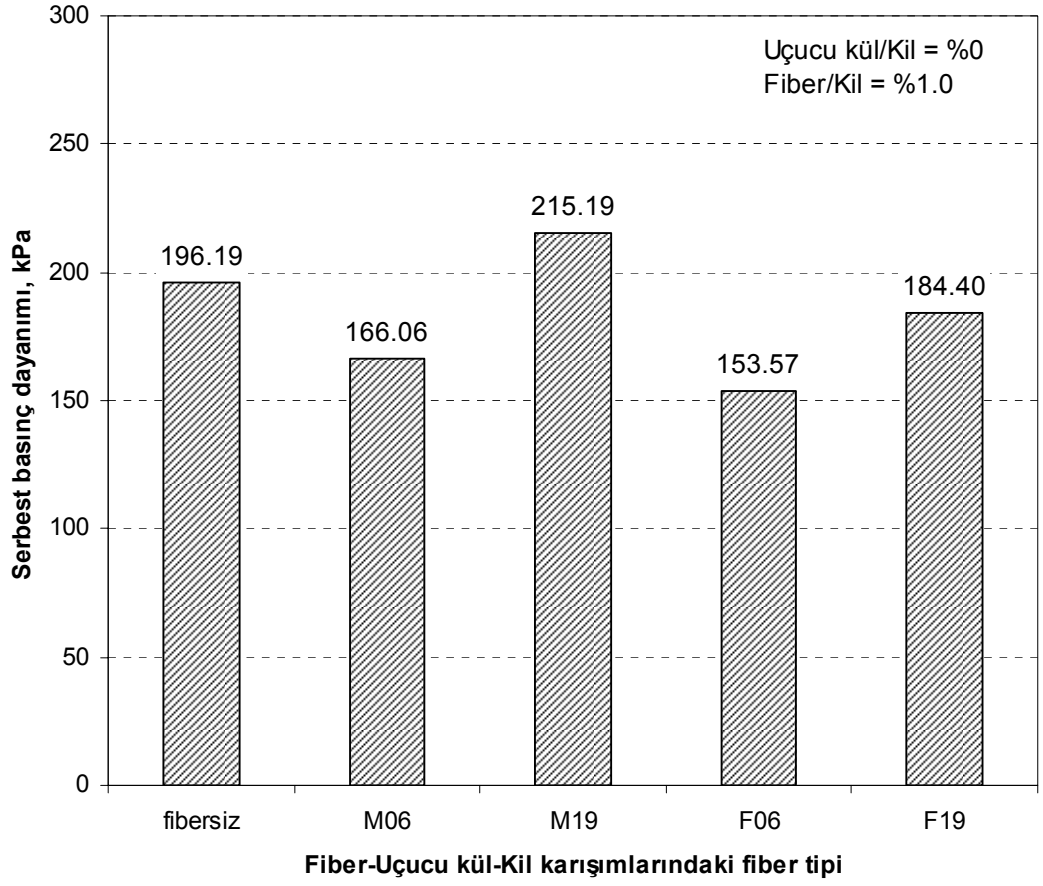
Şekil 3.21. M06 tipi fiberlerin kil ile karıştırılması

Şekil 3.22’de fiber katkısının saf kille birlikte karışımının tek eksenli basınç dayanımları gösterilmektedir. Fibersiz saf kilin 28 günlük dayanımı 169.19 kPa olurken, %0.5 fiber katkısı ile fiber tiplerinin tümünde dayanımın azaldığını gözlemlemekteyiz.



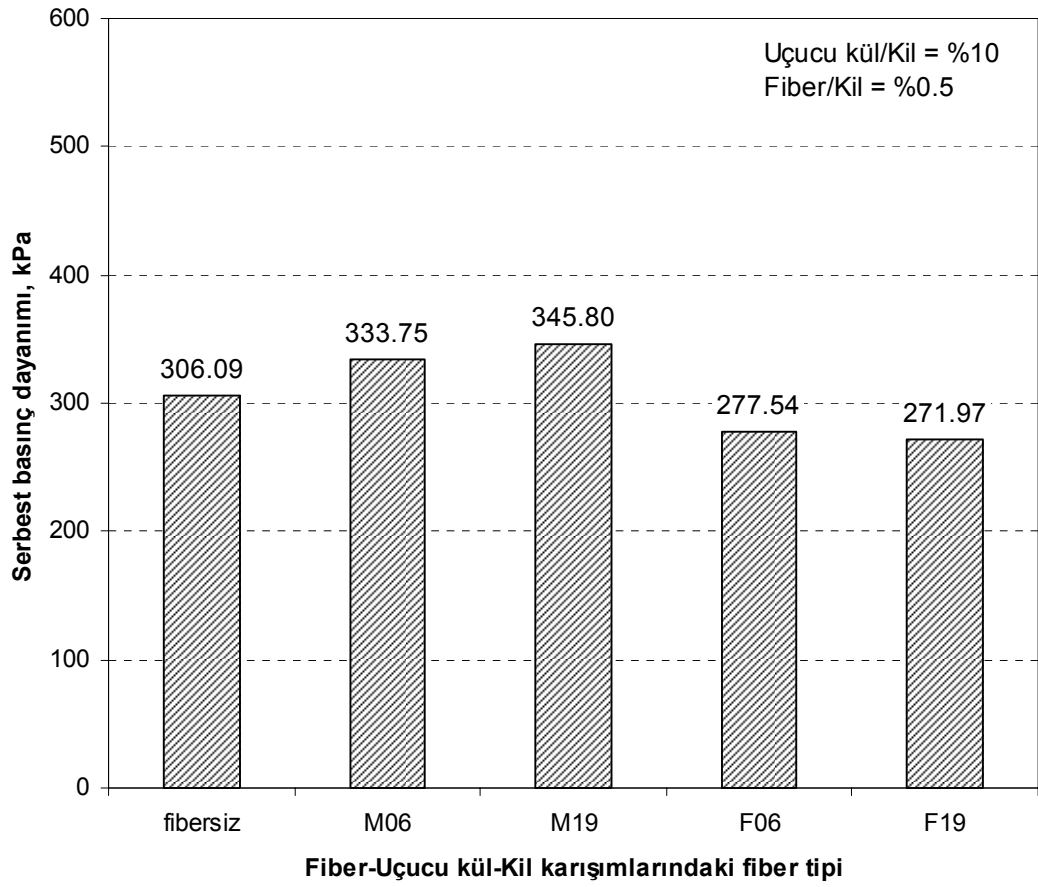
Şekil 3.22. 28 gün kürde bekletildikten sonra deneye tabi tutulan uçucu kül/kil oranı %0 ve fiber/kil oranı %0.5 olan fiber-uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımlarının fiber türü ve boyu ile değişimi.

Fiber oranını %1'e çıkardığımız 28 günlük deneylerde (Şekil 3.23.), yine uçucu külün olmadığı fiber katkılı killerde uzun boylu fiber tiplerindeki bir miktar tek eksenli basınç artımının dışında, çok ayırt edici bir artış olmamıştır.



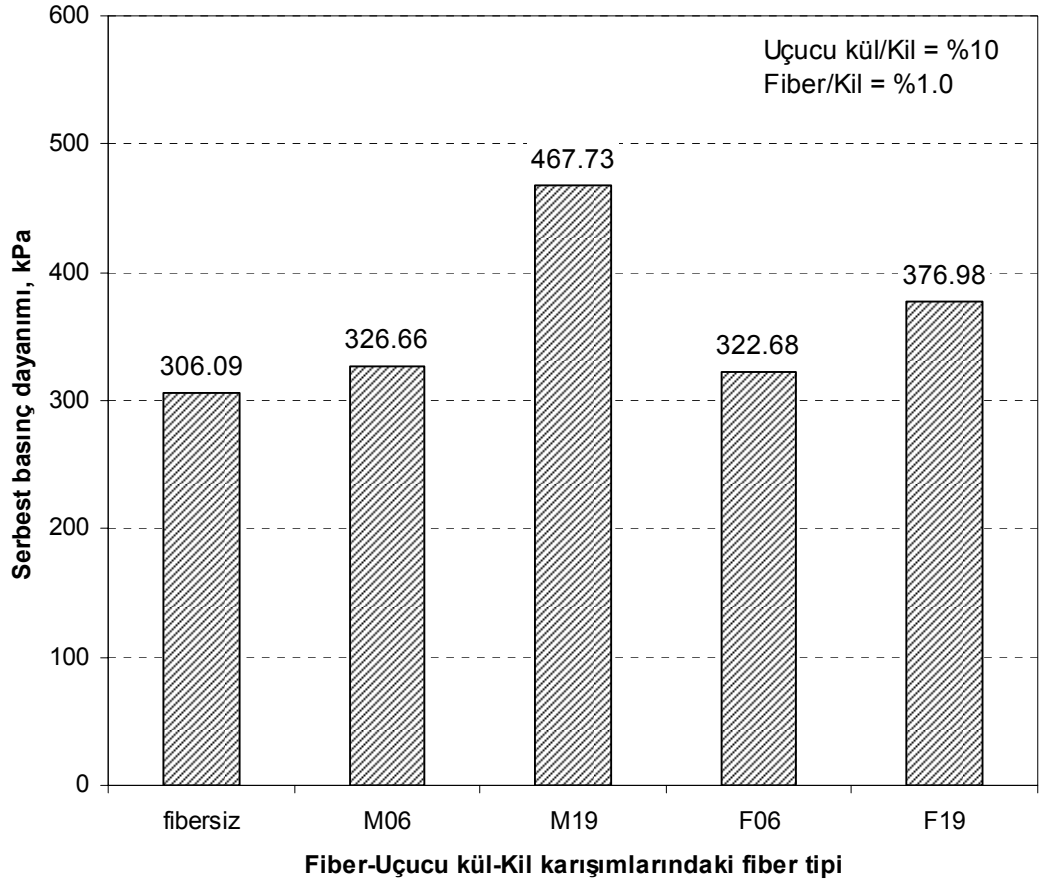
Şekil 3.23. 28 gün kürde bekletildikten sonra deneyine tabi tutulan uçucu kül/kil oranı %0 ve fiber/kil oranı %1.0 olan fiber-uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımlarının fiber türü ve boyu ile değişimi.

Karışımındaki uçucu kül oranı %10'a ve fiber oranı da %0.5 olduğu durumdaki veriler Şekil 3.24.' de verilmiştir. Karışımındaki uçucu kül etkisini göstermiş ve M tipi fiberlerin tek eksenli basınç dayanımları daha belirgin bir şekilde artmıştır. F tipi fiberler ise yine fibersiz karışıma oranla daha düşük tek eksenli basınç dayanımları sağlamıştır.

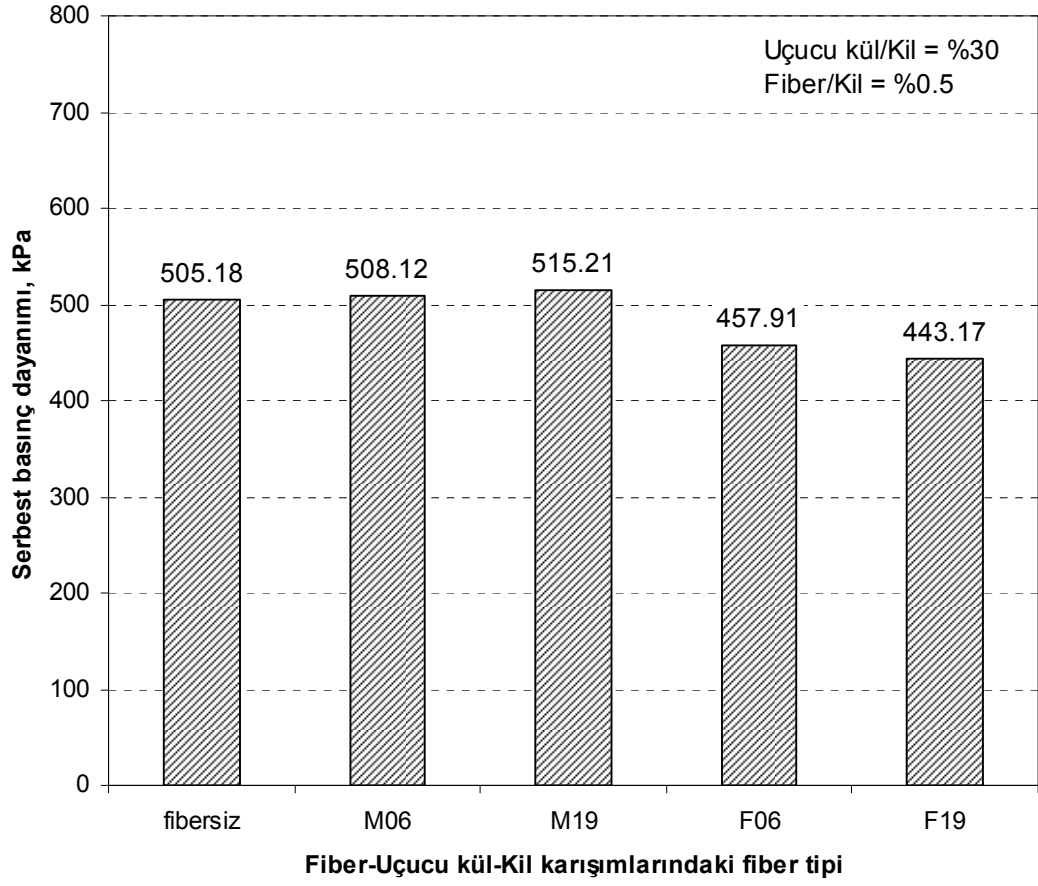


Şekil 3.24. 28 gün kürde bekletildikten sonra deneye tabi tutulan uçucu kül/kil oranı %10 ve fiber/kil oranı %0.5 olan fiber-uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımlarının fiber türü ve boyu ile değişimi.

Fiber oranının %1'e çıkarıldığı numunelerde M19 fiber tipi 467,73 kPa ile en yüksek tek eksenli basınç dayanımını göstermiştir(Şekil 3.25.) Bu deneyde dört fiber tipi de fibersiz numuneye göre daha yüksek tek eksenli basınç dayanımları göstermiştir. Aynı zamanda uzun boylu fiber tipleri, kısa boylu fiberler göre daha yüksek dayanım sergilemişlerdir.



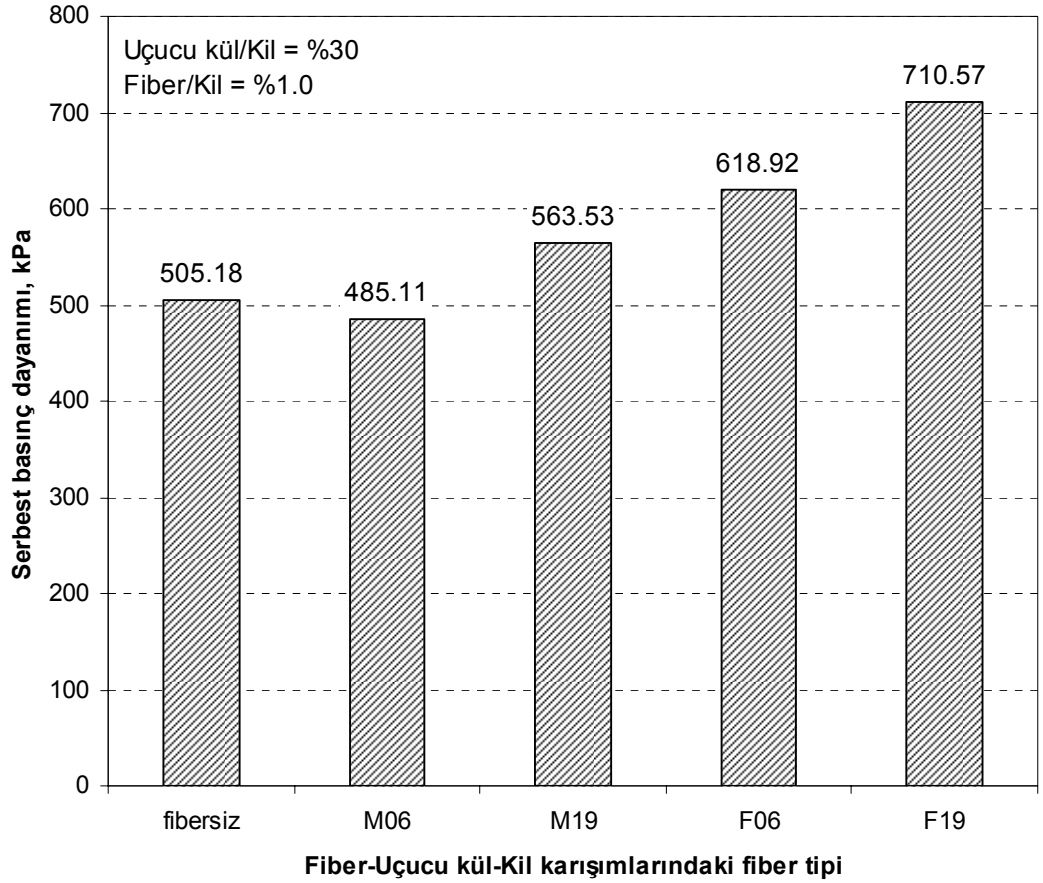
Şekil 3.25. 28 gün kürde bekletildikten sonra deneye tabi tutulan uçucu kül/kil oranı %10 ve fiber/kil oranı %1.0 olan fiber-uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımlarının fiber türü ve boyu ile değişimi.



Şekil 3.26. 28 gün kürde bekletildikten sonra deneye tabi tutulan uçucu kül/kil oranı %30 ve fiber/kil oranı %0.5 olan fiber-uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımlarının fiber türü ve boyu ile değişimi.

Uçucu kül oranının %30'a çıkarıldığı deneyde Şekil 3.26.'dan da görülebildiği gibi fiber oranı yine ilk olarak %0.5 olarak düşünülmüştür. Fiber oranının %0.5 olması yine etkisiz kalmış, karışımın tek eksenli basıncını M tipi fiberlerde etkilememiş, F tipi fiberlerde ise azaltmıştır.

Son olarak %30 uçucu kül ve %1.0 fiber karışımı daha çok F tipi fiberlerin tek eksenli basınç dayanımlarını artırdığı görülmüştür. Yine fiber boyutunun arttıkça dayanımında arttığı Şekil 3.27'deki grafikten açıkça görülmektedir.



Şekil 3.27. 28 gün kürde bekletildikten sonra deneye tabi tutulan uçucu kül/kil oranı

%30 ve fiber/kil oranı %1.0 olan fiber-uçucu kül-kil karışımlarının tek eksenli basınç dayanımlarının fiber türü ve boyu ile değişimi.

4. SONUÇLAR

Bu deneyde çalışmanın sonuçları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1) Uçucu kül-kil karışımlarındaki optimum su içeriği, karışımdaki uçucu kül miktarının artışıyla azalma eğilimi göstermektedir. Diğer yandan karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlığı, karışımdaki uçucu kül miktarının artmasıyla artma eğilimi göstermektedir.

2) Uçucu kül-kil karışımlarının optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkta standart Proctor enerjisi ile sıkıştırılarak hazırlanan numuneler üzerinde yürütülen tek eksenli basınç deneylerini göre:

1 gün ve 7 gün kürde bekletilen numunelerin tek eksenli basınç dayanımları çok az artma eğilimindedir. Diğer yandan 14 gün ve 28 gün kürde bekletilen numunelerin tek eksenli basınç dayanımı, karışımdaki uçucu kül miktarı ile belirgin olarak artmaktadır.

3) Fiber-uçucu kül-kil karışımlarının optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkta standart Proctor enerjisi ile sıkıştırılarak hazırlanan numuneler, 28 gün kürde bekletildikten sonra yürütülen tek eksenli basınç deneylerinde şu sonuçlar gözlenmiştir: Fiberin tek başına (uçucu kül katılmadan) kullanılması tek eksenli basınç dayanımını bir miktar düşürmektedir. Sadece %1 M19 fiber katkılı numunede dayanım çok az artmaktadır. %10 uçucu kül içeren karışımlar içinde benzer bir davranış söz konusudur. Diğer yandan %30 uçucu kül içeren karışımların tek eksenli

basınç dayanımı %0.5 fiber içeriği ile çok az azalırken, %10 fiber içeriği ise karışımın tek eksenli basınç dayanımını arttırmaktadır.

4) %30 uçucu kül - %0.1 fiber-kil karışımları dikkate alındığında F tipi fiberin tek eksenli basınç dayanımına etkisi M tipi fibere göre daha fazladır. Aynı zamanda her iki fiber içinde fiber boyu arttıkça tek eksenli basınç dayanımları da artmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Y.Yılmaz, ve V. Özeydin, Gölet Veya Sulama Kanalı Projelerinde Kullanılan Örselenmiş Zeminlerin İndeks Özellikleri İle Kompaksiyon Karakteristiklerinin İlişkilendirilebilirliği. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, ZM.12, 16-17 Ekim, Selçuk Üniversitesi, Konya, 339-350 (2008).
2. Y. Yılmaz, Experimental investigation of the strength properties of sand-clay mixtures reinforced with randomly distributed discrete polypropylene fibers. Geosynthetics International, (Accepted Manuscript) (2009).
3. D. R. Freitag, Journal of Geotechnical Engineering, V 112, n 8, p 823-826 (1986).
4. E. E.Sera, , Robles-Austriaco, L. and Pama, R.P Journal of Ferrocement, V20, n 2, p 109-124 (1990).
5. W.W. Crockford, W. P. Grogan, and D. S. Chill, Transportation Research Record, n 1418, p 60-66 (1993).
6. M.H. Maher, and Y.C. Ho, Journal of Geotechnical Engineering, V120, n 8, p 1381-1393 (1994).
7. R. M. Al Wahab, and M. A. El-Kedrah, Geotechnical Special Publication, n 46/1 , p 791-805 (1995).
8. L. E. Vallejo, and H.Yoo, Transportation Research Record, n 1474, p 108-115(1995).
9. M. S.Nataraj, and , K. L. McManis Geosynthetics International, V4, n 1, p 65-79 (1997).
10. A. J. Puppala, and C. Musenda, Transportation Research Record, n 1736, p 134-140(2000).
11. I. Iasbik, D. C. De Lima, C. A. B. Carvalho, C. H.C.Silva, E. Minette, and P. S. Barbosa, A. ASTM Special Technical Publication, n 1437, p 114-125(2002).

12. E. C. Ang, and L. J. Erik Geotechnical Testing Journal, V26, n 2, p 191-200 (2003).
13. M. Gosavi, K.A. Patil, S. Mittal, and S. Saran, Civil Engineering Division, V 84, n 4, p 257-262(2004).
14. A. Kumar, B. S. Walia, and J. Mohan, Construction and Building Materials, V 20, n 10, December, p 1063-1068(2006).
15. Z.H. Ozkul; G. Baykal, Geosynthetics International, V13, n 5, p 173-180(2006).
16. Y. Cai, B. Shi, C. W. W. Ng and C. S.Tang, Engineering Geology, V87, n 3-4, p 230-240(2006).
17. J. H. Kim, S. D. Cho, Y. S. Jang, and S. S. Kim, v 544-545, Eco-Materials Processing and Design VIII - ISEPD-8, Proceedings of the 8th International Symposium on Eco-Materials Processing and Design, p 629-632(2007).
18. S. Akbulut, S. Arasan, and E. Kalkan, Applied Clay Science, V38, n 1-2, , p 23-32
19. S.D. Rafalko, T. L. Brandon, G. M. Filz, and J. K. Mitchell, Transportation Research Record, n 2026, Geomaterials, p 21-29(2007).
20. S.G.L. Babu and A.K. Vasudevan, Journal of Materials in Civil Engineering, V 20, n 9, p 571-577(2008).
21. S.A. Naeini and S.M. Sadjadi, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, V13 K, p 10-12(2008).
22. A. Kalhor, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, V13 K, p15-17(2008).
23. ASTM D 422-63. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1-8, (2002).
24. ASTM D 4318-00. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1-14(2002).
25. ASTM D 854-02. Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1-7(2002).

26. ASTM D 2487-00. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1-12(2002).
27. ASTM 618-05. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, pp. 1-3 (2002).
28. Polipropilen Elyaf Sanayi ve Dış Ticaret Ltd. Şti., Katalog (2009)
29. ASTM D 698-00a. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³(600 kN-m/m^{3- 30. ASTM D 2166-00. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, pp. 1-6(2002).}