

## FRP LİFİ İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ SİLTİLİ KUMUN KAYMA MUKAVEMETİNİN BÜYÜK ÖLÇEKLİ DİREKT KESME KUTUSU DENEYİ KULLANARAK BELİRLENMESİ

*Saeid ZARDARI* \*<sup>ID</sup>

*Amir SHAHKAR* \*\*<sup>ID</sup>

*Pegah DADRAS* \*\*\*<sup>ID</sup>

Alınma: 09.07.2021, düzeltme: 01.09.2021, kabul: 26.10.2021

**Öz:** İnşaat ve geoteknik projelerinin birçoğunda saha zemininin gerekli teknik ve mekanik özelliklere sahip olmaması zeminin iyileştirilmesi gerekliliğini kaçınılmaz kılmaktadır. Zemin iyileştirme ve güçlendirme yöntemleri arasında zeminin rastgele dağılımlı lifler ile güçlendirilmesinden bahsedilebilir. Bu çalışmada, laboratuvar ortamında rastgele dağılımlı FRP lifleri ile güçlendirilmiş siltli kumun kayma mukavemeti, kesme kutusu deneyi ile incelenmiştir. Büyük boyutlu numunelerin daha gerçekçi olması ve davranışları zeminin sahadaki gerçek davranışıyla daha uyumlu olması nedeniyle, çalışmada, büyük ölçekli (300\*300 mm) kesme kutusu deney cihazı kullanılmıştır. Zemini güçlendirmek için 30 ve 40 mm uzunluğunda lifler kullanılmıştır. Zemin-lif karışımlarında liflerin ağırlıkça yüzdeleri %0,1, 0,2, 0,3 ve 0,4 olarak alınmıştır. Liflerin ağırlık yüzdesi, liflerin ağırlığının zeminin kuru ağırlığının oranıdır. Saf zeminin sürtünme açısı 27,7 derece ve kohezyonu 15 kPa iken, güçlendirilmiş zeminin maksimum sürtünme açısı 40,7 dereceye, kohezyon ise 18 kPa'a kadar yükselmiştir. İçsel sürtünme açıları karşılaştırıldığında %47'lik bir artış görülmektedir. Deney sonuçlarından elde edilen verilerden hareketle lif içeriğinin artmasıyla zeminin kayma mukavemetinin önce arttığı ve daha sonra azaldığı gözlemlenmiştir. Lif içeriği %0,3 ve lif uzunluğu 30 mm olan karışımlarda maksimum kayma mukavemet elde edilmiştir. Dolayısıyla çalışmada optimum lif içeriği ve lif uzunluğu sırasıyla %0,3 ve 30 mm olarak elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kayma Mukavemeti, FRP Lifleri, Zemin Güçlendirmesi, Siltli Kum, Büyük Ölçekli Kesme Kutusu Deneyi

### Determination of The Shear Strength of FRP Fiber Reinforced Silty Sand Using Large Scale Direct Shear Test

**Abstract:** In many of the construction and geotechnical projects, the fact that the soil of the project site does not have the necessary technical and mechanical properties makes the necessity of soil improvement inevitable. Among the soil improvement and reinforcement methods, the reinforcement of the soil with randomly distributed fibers can be mentioned. In this study, the shear strength of silty sand reinforced with randomly distributed FRP fibers was investigated in the laboratory using direct shear test. A large-scale (300\*300 mm) direct shear test device was used in this study, as large sized specimens are more realistic and their behavior is more compatible with the actual behavior of the soil in the field. Fibers with the lengths of 30 and 40 mm were used to reinforce the soil. The weight percentages of fibers in the soil-fiber mixtures are 0.1, 0.2, 0.3 and 0.4%. The weight percent of the fibers is the ratio of the weight of the fibers to the dry weight of the soil. While the friction angle of the pure soil was 27.7 degrees and the cohesion was 15 kPa,

\* Mohaghegh Ardabili Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Fakültesi, Ardabil, İRAN

\*\* Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, TÜRKİYE

\*\*\* İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

İletişim Yazar: Saeid ZARDARI (saeidzardari@gmail.com)

the maximum internal friction angle of the reinforced soil increased up to 40.7 degrees and the cohesion up to 18 kPa. Comparing the internal friction angles, an increase of 47% can be observed. Considering the test results, it was observed that the shear strength of the soil first increased and then decreased with the increase in fiber content. Maximum shear strength was obtained in mixture with a fiber content of 0.3% and a fiber length of 30 mm. Therefore, in this study, optimum fiber content and fiber length were obtained as 0.3% and 30 mm, respectively.

**Keywords:** Shear Strength, FRP fibers, Soil Reinforcement, Silty Sand, Large Scale Direct Shear Test

## 1. GİRİŞ

Toprak barajlar, karayolları, demiryolları, bina temeli dolguları gibi önemli yapıların yapımında zemin kullanılmaktadır. Toprak yapıların boyutları dikkate alındığında bu yapıların inşası yüksek maliyetler içerdiğinden işletme süresi boyunca uzun süreli stabilite ve kullanılabilirliğin sağlanması bu yapıların yapımındaki hayati konulardan biridir. Çoğu inşaat projesinin kaçınılmaz olarak ayrılmaz bir parçasını oluşturan malzemeler olarak, zeminlerin davranışının kapsamlı bir şekilde anlaşılması, tasarım yöntemlerinin geliştirilmesinde ve daha gerçekçi analizlerin yapılmasında etkili bir rol oynayabilir. Zemin mekaniği, mühendislere, gelen yükler altındaki zeminlerin davranışını ve performansını kolayca tahmin etme ve gerekirse problemlerin ve engellerin üstesinden gelme yeteneğini vermiştir. Çoğu inşaat ve geoteknik projelerinde, proje sahasının zemini gerekli teknik ve mekanik özelliklere sahip değildir ve bazı zemin parametrelerinin iyileştirilmesi kaçınılmazdır. Kimyasal ve mekanik yöntemler de dahil olmak üzere çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri vardır. Kimyasal yöntemlerde zemini iyileştirmek ve stabilize etmek için kireç, çimento, alçı ve diğer kimyasal katkı maddeleri kullanılır. Kimyasal zemin stabilizasyon yöntemleriyle ilgili sorunlardan biri, zemin stabilizasyonu için gereken sürecin nispeten uzun olması ve kimyasal malzemenin çevresel sorunlarıdır. Ayrıca başka bir sorun, çimento veya kireçle iyileştirilmiş zeminlerin gevrek davranış sergilemesidir (Sariosseiri ve Muhunthan, 2009).

Mekanik yöntemler, zemini sıkıştırmayı veya geosentetikler, çelik şeritler veya sentetik lifler ile zemini güçlendirmeyi içerir. Zeminin mukavemetini artırmanın en basit yolu zeminin sıkıştırılmasıdır ancak zemin sıkıştırması istenilen sonucu vermezse diğer stabilizasyon yöntemlerinin kullanılması kaçınılmaz olacaktır.

Takviye elemanlarının zemin kütlesi içinde rastgele dağıldığı mekanik stabilizasyon yönteminde bu elemanlar zemin içerisine homojen dağılarak zemin tanelerini birbirine bağlayarak zemin kütlesinin mukavemetini arttırmaktadır. Geosentetiklerin ve katmanlı takviyelerin aksine, lifler kireç ve çimento gibi zeminle kolayca karışarak zeminin kayma mukavemetini ve sünekliğini arttırmaları (Li vd., 2014). Birçok geoteknik projede doğal ve sentetik lifler ile zemin iyileştirmesi önerilmiştir. Lif ile zemin güçlendirme konusunda bugüne kadar birçok araştırma yapılmıştır. Nataraja ve McManis (1997), Sentetik lif ile güçlendirilmiş kil ve kum zeminin davranışını, kompaksiyon, kesme kutusu deneyi, tek eksenli ve CBR deneyleri ile incelemişler ve kayma direncinde, tek eksenli basınç dayanımında ve CBR’da bir artış gözlemlemişlerdir. Kesme kutusu deney sonuçları incelendiğinde kum ve kil numunelere lif eklenmesi, kayma mukavemeti değerlerinde önemli artışlarla sonuçlanmıştır. Saf kum için sırasıyla  $\phi=33,5$  derece ve  $c=0$  kPa iken %0,3 lif içeriğine sahip donatılı kum için sırasıyla  $\phi=38$  derece ve  $c=9,6$  kPa olmuştur. Bu, güçlendirilmiş kum numunesi için  $\phi$  ve  $c$  değerlerinde yaklaşık %13'lük bir artışı göstermektedir. Chegenizadeh ve Nikraz (2012) sentetik liflerin siltli kumun mukavemet parametreleri üzerindeki etkisini araştırmak için üç eksenli deneyler yapmışlar ve lif tipi, lif uzunluğu ve lif ağırlıkça yüzdesinin zemin mukavemetini etkileyen üç parametre olduğu sonucuna varmışlardır. Deneyler, lif içeriğinin artmasıyla mukavemetin önemli ölçüde arttığını kanıtlamıştır. Ayrıca sonuçlar, fiber uzunluğundaki artışın karışımın mukavemetini arttırdığını kanıtlamıştır.

Dean ve Freitag (1986), tek eksenli deneyler yaparak sentetik liflerin killi kumun davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir ve bu zemine liflerin eklenmesinin bu kumun gerilme-şekil değiştirme eğrisini değiştirerek mukavemeti arttırdığı ve başlangıç rijitliğini azalttığı sonucuna

varmışlardır. Krishna ve Nasr (2014), keten lifi ile güçlendirilmiş siltli kumun serbest basınç dayanımını ve CBR'sini incelemişlerdir. Deneylerin sonuçları, keten liflerinin eklenmesinin, güçlendirilmiş zeminin rijitliği ve sünekliğini arttırdığını göstermiştir. Hoare (1979), polipropilen lifleri ile güçlendirilmiş bir kum-çakıl numunesi üzerinde bir dizi basınç ve CBR deneyi gerçekleştirerek, zemindeki liflerin varlığının zeminin içsel sürtünme açısını ve CBR'yi arttırdığını göstermiştir. Al-Adili vd., (2012) zemini güçlendirmek için zemine hacminin %5, %10, %15 ve %20 oranında papirüs lifleri eklemişler. Kesme kutusu deneyi ve konsolidasyon deneyleri yapmışlar ve optimum lif içeriğinde sadece zemin-lif karışımının kesme dayanımının maksimum olmadığı, aynı zamanda elastisite modülünün de maksimum olduğu sonucuna varmışlardır. Kesme kutusu deneyi sonuçlarına göre, zemine eklenen lif miktarı ile kayma mukavemetindeki artış arasındaki ilişki önce artmakta, daha sonra azalmaktadır. Maksimum kayma mukavemeti zemine %10 papirüs lifi eklendiğinde elde edilmiştir. Dolayısıyla optimum lif içeriği %10 olarak belirlenmiştir.

Wang vd., (2016), tek eksenli ve üç eksenli deneyleri yaparak, killi kumların mukavemeti ve sünekliği üzerine bazı polimer liflerin eklenmesinin etkisini araştırmış ve kullanılan liflerin ağırlık yüzdesinin artmasıyla optimum su içeriğinin arttığı sonucuna varmışlardır. Shukla vd., (2015), lif ile güçlendirilmiş zeminin sıkıştırılabilirliğini ve geçirgenliğini incelemişlerdir. Sonuçlar, lif ile güçlendirilmiş zeminlerin boşluk oranının lif-zemin katı hacim oranına bağlı olduğunu göstermiştir. Noorzad ve Zarinkolaei (2015), Polipropilen lifi ile güçlendirilmiş kum zemini üzerinde üç eksenli ve kesme kutusu deneyleri yapmışlar ve sonuçlarını karşılaştırmışlar. Deneylerde üç farklı lif uzunluğu (6, 12, 18 mm) ve üç farklı lif içeriği (%0,25, 0,50, 1) kullanmışlar. Hem kesme kutusu deneyi hem de üç eksenli deneylerde, lif uzunluğu ve artışı ile birlikte karışımın kayma mukavemetinde artış gözlemlenmiştir. Kesme kutusu deneyi ile üç eksenli deneyin sonuçlarını karşılaştırdıklarında, üç eksenli deneyden daha iyi sonuçlar elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Claria ve Vettorelo (2016), lif ile güçlendirilmiş gevşek kumların kesme mukavemetini incelemişler. Noorzad ve Zarinkolaei (2015) tarafından elde edilen sonuçların aksine, kesme kutusu deneyi ile ölçülen içsel sürtünme açılarının üç eksenli deneylerden elde edilen değerlerden daha yüksek olduğunu bulmuşlar.

Yetimoglu ve Salbas (2003), lif ile güçlendirilmiş zeminin direkt kesme koşullarında kayma mukavemetini incelemişler ve bu tip takviyenin etkisinin sıkı zeminlerden ziyade gevşek zeminlerde daha fazla olduğu sonucuna varmışlar. Anagnostopoulos vd. (2013) lif ile güçlendirilmiş kumlar üzerinde kesme kutusu deneyi gerçekleştirmişler. Laboratuvar sonuçları, lif takviyesinin orta yoğunluklu ince kumların mukavemetinin iyileştirdiğini, yüksek yoğunluklu durumdaki güçlendirilmiş kumların ise ihmal edilebilir bir mukavemet artışı gösterdiğini ortaya koymuştur. Kumar vd. (1999), sentetik liflerin zemin mukavemet parametreleri üzerindeki etkisini kesme kutusu deneyleri yaparak araştırmışlardır. Deneylerde zemine lif eklemesiyle birlikte, zeminin içsel sürtünme açısında ve kohezyon katsayısında artış gözlemlenmiştir. Sadık vd. (2010), lif ile güçlendirilmiş ince ve kaba kumun kayma mukavemetini kesme kutusu deneyi ile incelemişlerdir. Sonuçlar, deney düzeneği ve lifleri karıştırmak için kullanılan prosedüre bağlı olabilen bir lif-tane boyutu oranlarının etkisinin varlığını göstermektedir.

Literatür taraması, lif ile güçlendirilmiş zeminlerin mekanik özelliklerini etkileyen birçok parametrenin olduğunu ortaya koymaktadır. Zemin kütlesi içinde liflerin rastgele dağılımı nedeniyle, liflerin ve zemin tanelerinin görelî yerleşimine müdahale eden birçok faktör, modifiye edilmiş zeminin mekanik özelliklerini de etkileyecektir. Ayrıca, lifler ile güçlendirilmiş zeminin özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerden biri de numunelerin ölçeğidir. Sadek vd., (2010) tarafından atıfta bulunulan numunenin ölçek etkisi, lif-tane boyutu oranından veya lif-tane-kesme kutusu boyutu oranından kaynaklanabilir.

Büyük boyutlu numuneler daha gerçekçidir ve davranışları zeminin sahadaki gerçek davranışıyla daha uyumludur. Deney numunesinin boyutu göz önüne alınarak, bu çalışmada, büyük ölçekli (300\*300 mm) kesme kutusu deney cihazı kullanılmıştır. Laboratuvarda rastgele dağılmış FRP lifleri ile güçlendirilmiş siltli kumun kayma mukavemeti incelenmiştir. Ayrıca, lif

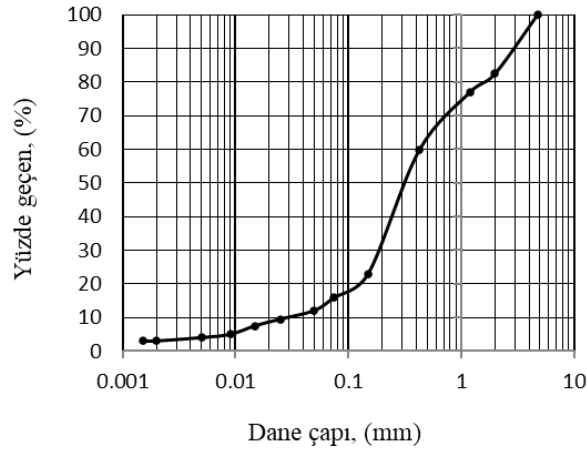
uzunluğu ve lif içeriğinin zeminin kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

## 2. GEREÇ VE YÖNTEM

### 2.1. Malzeme

Bu araştırmada kullanılan zemin Parsabad-İran havalimanının şantiye zeminidir. Deney numuneleri hazırlamak için bu zemin 4 No'lu elekten geçirildikten sonra kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan zemini sınıflandırmak için ASTM D422 (2007) standardına uygun elek analizi ve hidrometre analizi yapılmıştır. Zeminin ince tane kısmının kıvam limitleri ASTM D4318 (2017) standardına göre belirlenmiştir.

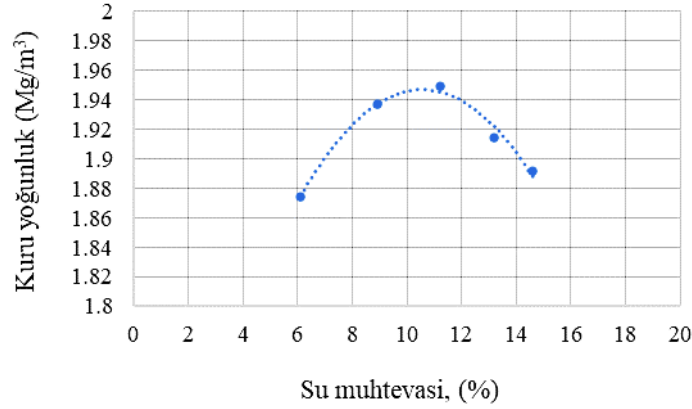
Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) (ASTM D2487, 2017) göre bu araştırmada kullanılan zemin siltli kum (SM) sınıfındadır. Zeminin granülometri eğrisi Şekil 1'de gösterilmiştir.



**Şekil 1:**  
Çalışmada kullanılan zeminin granülometri eğrisi

Kompaksiyon deneyi ASTM D 698 (2012) standardına uygun olarak yapılmıştır ve zemine ait kompaksiyon eğrisi Şekil 2'deki gibi elde edilmiştir. Zeminin optimum su muhtevası %11 ve maksimum kuru yoğunluğu  $1,95 \text{ (Mg/m}^3\text{)}$  olarak elde edilmiştir.

Zeminin özgül ağırlığını belirlemek için ASTM D854'e (2014) uygun deney yapılmıştır ve zeminin özgül ağırlığı 2,72 olarak elde edilmiştir.



**Şekil 2:**  
*Çalışmada kullanılan zeminin kompaksiyon eğrisi*

Kum güçlendirilmesinde kullanılan lifler, FRP (Fiber Reinforced Polymers) kompozit cam lifidir. FRP lifleri diğer malzemeye göre hafif ve esnektir. Aynı zamanda yüksek çekme direncine ve korozyona karşı iyi dayanıklılığa sahip kompozit bir malzemedir. FRP levhaların çekme direnci, çelik levhalarınınkinin en az 2 ila 10 katıdır, ağırlıkları ise çeliğin ağırlığının sadece %20'sidir (Darby, 1999).

Bu çalışmada kumu güçlendirmek için kullanılan lifler iki farklı uzunlukta (30 ve 40 mm) kesildikten sonra lif grubu tek ipliklere ayrılmıştır (Şekil 3). Bahsedilen liflerin özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

**Tablo 1.** Çalışmada kullanılan FRP liflerin özellikleri

Özellik	Değer	Birim
Elastisite modülü	70	GPa
Çekme direnci	2200	MPa
yoğunluk	1,6	Mg/m <sup>3</sup>
Renk	beyaz	



**Şekil 3:**  
*Farklı uzunluklarda kesilmiş ve tek ipliklere ayrılmıştır lifler*

## 2.2. Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada, lif ile güçlendirilmiş kum numunelerinin hazırlanmasında 30 ve 40 mm uzunluğundaki liflerden ağırlıkça yüzde %0,1, %0,2, %0,3 ve %0,4'ü kullanılmıştır. Liflerin ağırlık yüzdesi, liflerin ağırlığının zeminin kuru ağırlığına oranıdır. Büyük ölçekli kesme kutusu deney numuneleri hazırlamak için zeminin No.4 eleğinden geçmiş olan kısmı kullanılmıştır. Kum-lif karışımı hazırlamak için kesme kutusunun hacmine göre zemin miktarı hesaplanmış ve tartılmıştır. Her bir deney için lif içeriğine göre kullanılan lif miktarı belirlenmiştir. Daha sonra optimum su içeriğine göre su miktarı belirlenmiştir.

Kuru zemine lif eklendiğinde lifler birbirine yapışmaya meydediyor ve homojen bir karışım elde etmek daha çok zaman alıyor ve yorucu oluyor. Ayrıca karışımlar elle yapıldığından kuru zemini karıştırırken çıkan duman rahatsız edici olduğundan önce kum bir miktar su ile nemlendirilmiş ve ardından lifler yavaş yavaş kuma eklenmiştir. Kum ve lif karışımı tamamen homojen bir karışım elde edilinceye kadar elle karıştırılmış ve karışımın homojenliği görsel olarak kontrol edilmiştir. Son aşamada ise kuma optimum su muhtevasına kadar su ilave edilir ve karıştırılır. Karışım hazırlandıktan sonra kesme kutusunun hacmine göre karışımdan belirli bir ağırlık kesme kutusuna konulur ve özel bir çekiçle karışım %90 yoğunluğa kadar sıkıştırılır. Şekil 4, kum-lif karışımını ve kesme kutusundaki konumunu göstermektedir.



a.



b.

### Şekil 4:

Numunelerin hazırlanma aşamaları, a. Kum-lif karışımı b. karışımın kesme kutusuna konulması

## 2.3. Kesme Kutusu Deneyi

Bu araştırmada, kumun kayma mukavemetini belirlemek için büyük ölçekli kesme kutusu deneyi kullanılmıştır. Kesme kutusunun boyutları 300\*300 mm'dir. Deney numunesinin yüksekliği 150 mm'dir. Daha doğru sonuçlar elde etmek için, tüm deneyler, saf kum ve güçlendirilmiş kum için aynı laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir. Numuneler 25, 50 ve 100 kPa'lık normal gerilmeler altında deneye tabi tutulmuştur. Tüm deneyler için yatay yer değiştirme hızı dakikada 0,5 mm'dir. Kesme kutusu deneyleri ASTM D 3080'a uygun olarak yapılmıştır. Kumun kohezyonu ve içsel sürtünme açısı, Mohr-Coulomb kırılma kriteri temelinde ifade edilmiştir. Şekil 5'te büyük ölçekli kesme kutusu cihazı görülmektedir.

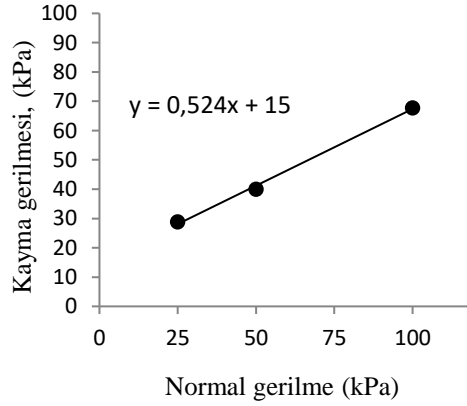


**Şekil 5:**  
*Büyük ölçekli kesme kutusu cihazı*

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Saf Kumun Kesme Kutusu Deney Sonuçları

Önce, saf kum üzerinde kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Deney sonuçlarına ait normal gerilme-kayma gerilmesi diyagramı Şekil 6'da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, saf kumun içsel sürtünme açısı 27,7 derece ve kohezyonu 15 kPa'dır.



**Şekil 6:**  
*Saf kumun normal gerilme- kayma gerilmesi diyagramı*

#### 3.2. Lifler ile Güçlendirilmiş Kumun Kesme Kutusu Deney Sonuçları

##### 3.2.1. Lif İçeriği ve Lif Uzunluğu Etkisi

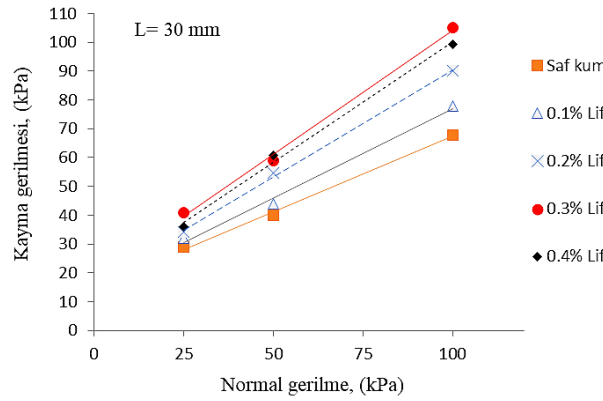
Saf kum üzerinde kesme kutusu deneyi yapıldıktan sonra, lif uzunluğu 30 ve 40 mm ve ağırlık yüzdeleri %0,1, %0,2, %0,3 ve %0,4 olan güçlendirilmiş numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır. Her bir deney seti üç farklı normal gerilme altında yapıldığından dolayı, saf kum deneyleri ve tekrarları ile birlikte toplam 54 deney yapılmıştır.

Büyük ölçekli kesme kutusu deney aleti, hacimli olduğu için çok miktarda kum-lif karışımı hazırlanmış ve kullanılmıştır. Karışım hazırlama aşaması tamamen elle yapıldığı için karışım



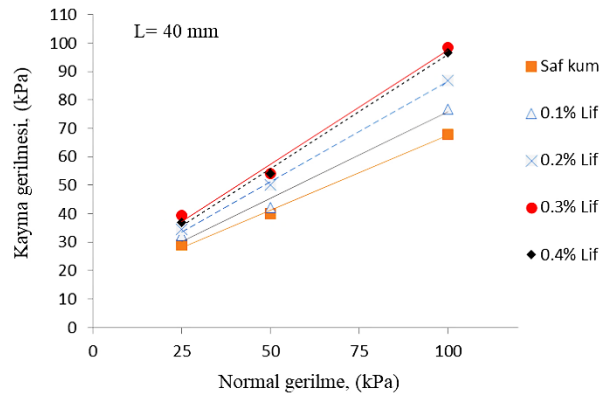
hazırlama aşamasında çok zaman harcanmıştır. Optimum miktarda deney yapmak adına araştırmacılar (Ouria ve Zardari, 2017) daha önce yapmış oldukları küçük ölçekli deneylerin sonuçlarına dayanarak optimum lif uzunluğunu, tane çapına ve numune boyutlarına göre hesaplayarak, büyük ölçekli deneyler için lif uzunluğunu elde ettikleri değerlere yakın değerler seçmişlerdir. Küçük ölçekli deneylerde numuneleri hazırlamak için zeminin No.10 eleğinden geçmiş olan kısmı kullanılmıştır. Bu deneylerde optimum lif uzunluğu 10 mm olarak elde edilmiştir ki bu da kullanılan zeminin maksimum tane çapının 5 katına denk gelmektedir. Daha uzun liflerin kullanılması ile kayma mukavemetinde önemli bir artış gözlemlenmemiştir ki bu durum numunenin boyutları ile ilgili olabilir. Dolayısıyla araştırmacılar daha büyük ölçekli deney cihazı kullanarak lif uzunluğunu kullanılan kumun maksimum tane çapının 5 katı ve üstünü seçmişlerdir.

Şekil 7 ve 8, farklı lif içeriği ile güçlendirilmiş kumun Mohr-Coulomb kırılma zarflarını göstermektedir. Lifler ile güçlendirilmiş numunelerin kırılma zarfları ile güçlendirilmemiş numunelerin kırılma zarflarının karşılaştırıldığında, lifler ile güçlendirilmiş numunelerin kayma mukavemetinde artış görülmektedir. Kumun kayma mukavemeti parametrelerinin maksimum artışının esasen maksimum lif içeriği veya maksimum lif uzunluğu için meydana gelmediği gözden kaçırılmamalıdır.



**Şekil 7:**

*Lif uzunluğu 30 mm ve farklı lif içeriği ile güçlendirilmiş kumun Mohr-Coulomb kırılma zarfı*



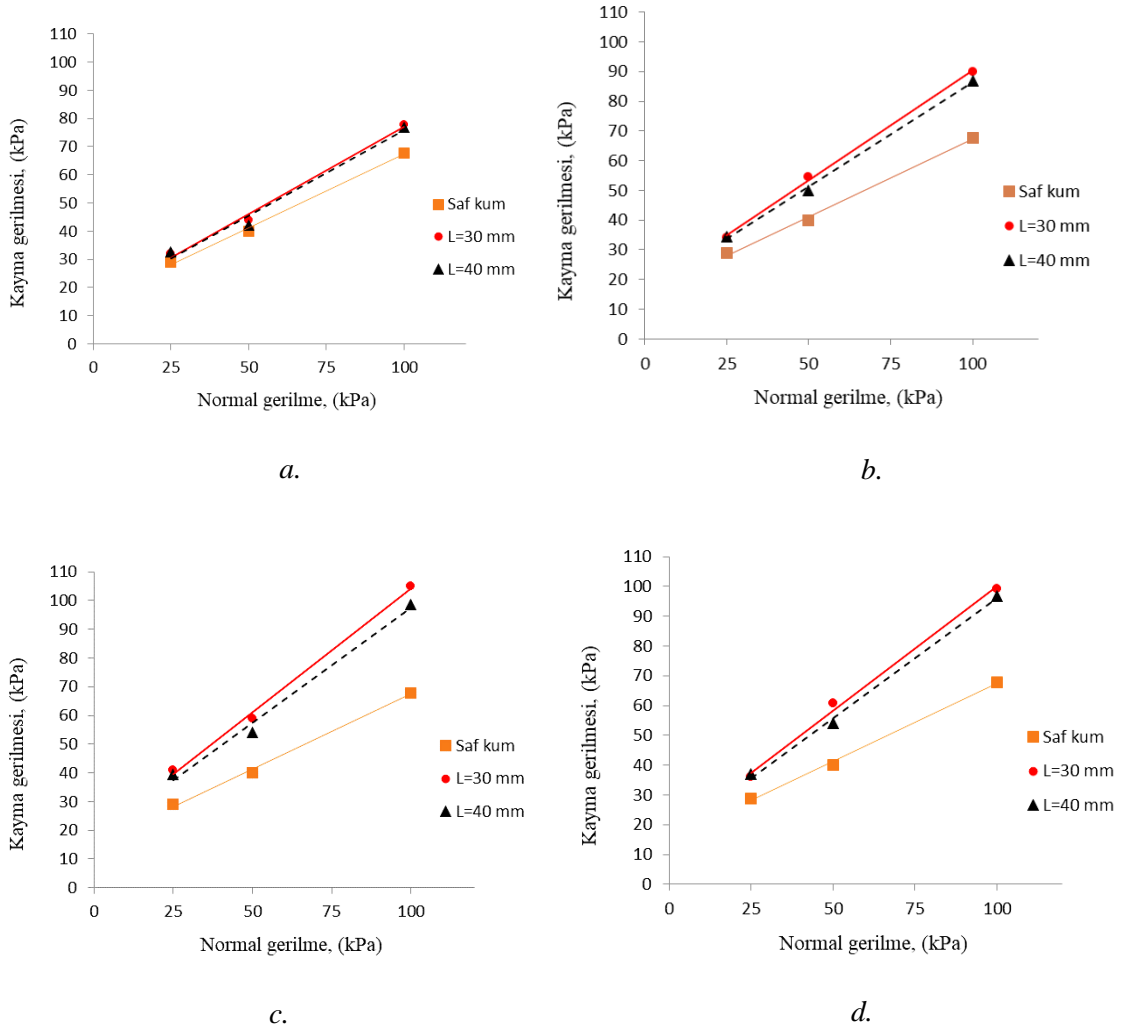
**Şekil 8:**

*Lif uzunluğu 40 mm ve farklı lif içeriği ile güçlendirilmiş kumun Mohr-Coulomb kırılma zarfı*



Şekil 7 ve 8’de görüldüğü gibi, kumun kayma mukavemeti artan lif içeriği ile önce artmaktadır ve daha sonra azalmaktadır. Bununla birlikte, farklı yüzdelerde lifler ile güçlendirilmiş numunelerin kayma mukavemeti, her zaman güçlendirilmemiş numunenin kayma mukavemetinden daha fazladır. Her iki lif uzunluğu için maksimum kayma direnci %0,3 lif içeriğinde elde edilmiştir. %0,3 lif içeriğinden sonra lif artışıyla birlikte kayma direnci artış göstermemektedir.

Şekil 9’da lif uzunlukları farklı lif içeriklerde karşılaştırılmıştır. Grafiklerde görüldüğü üzere 30 mm’lik lifler ile güçlendirilmiş numunelerin kayma mukavemeti 40 mm’lik numunelere göre daha fazladır.



Şekil 9:

Farklı lif uzunluğu ile güçlendirilmiş kumun Mohr-Coulomb kırılma zarfı  
a. Lif içeriği %0,1 b. Lif içeriği %0,2 c. Lif içeriği %0,3 d. Lif içeriği %0,4

Liflerin uzunluğu arttıkça kenetlenme uzunluğu artar, yani lifleri zeminden çıkarmak için daha fazla kuvvet gerekir. Bu nedenle liflerin uzunluğu arttıkça zeminin kayma mukavemeti artar, ancak diğer yandan sabit ağırlık yüzdesinde uzunluk arttıkça kesme yüzeyini kesen lif sayısı azalır, bu da zeminin kayma direncinin azalmasına neden olur. Ayrıca, uzun liflerin bükülmesi ve

burulmasından dolayı zeminin kayma mukavemetinde azalma meydana gelebilir. Liflerin çapının düşük olması nedeniyle uzunluk arttıkça lifleri düz bir çizgide düzeltmek daha zor hale gelir ve lifler bükülür. Aslında, bu durumda, bükülmüş liflerin performansı, daha kısa uzunluktaki düz liflerin performansına benzer. Lif uzunluğunun aşırı artması veya lif içeriğinin yüksek olması, liflerin bükülmelerine, topaklanmalarına ve düzensiz dağılmasına neden olabilir ve zeminde homojen olmayan bir yapı oluşturarak güçlendirilmiş zeminin mukavemetinin azalmasına neden olabilir (Wang vd., 2016).

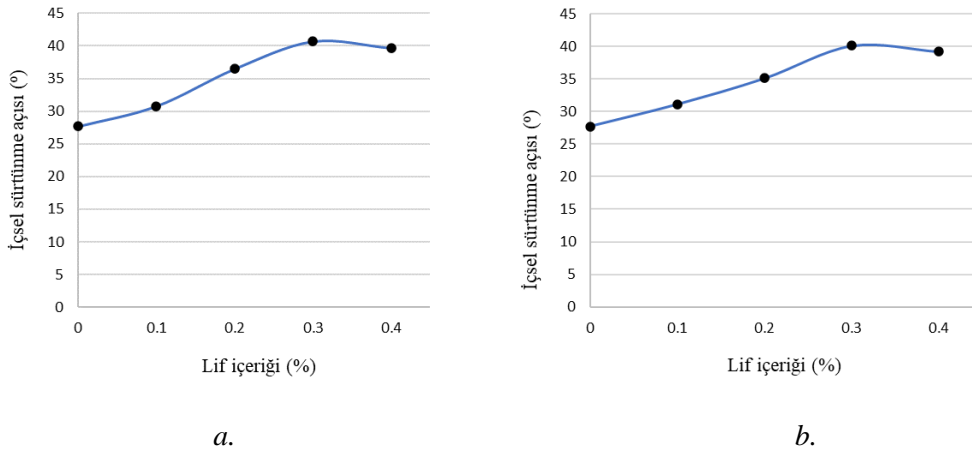
Bu çalışmada güçlendirilmiş kumun en yüksek kayma mukavemeti, 30 mm lif uzunluğu ve %0,3 lif içeriğinde elde edilmiştir. Yukarıdaki grafiklerde görüldüğü gibi liflerin eklenmesi, kırılma zarfının eğiminde ve yüksekliğinde bir değişikliğe neden olmaktadır ki buda zeminin kohezyon ve içsel sürtünme açısı üzerindeki etkiyi belirtmektedir.

### 3.2.2. Liflerin Güçlendirilmiş Kumun Kayma Mukavemeti Parametrelerine Etkisi

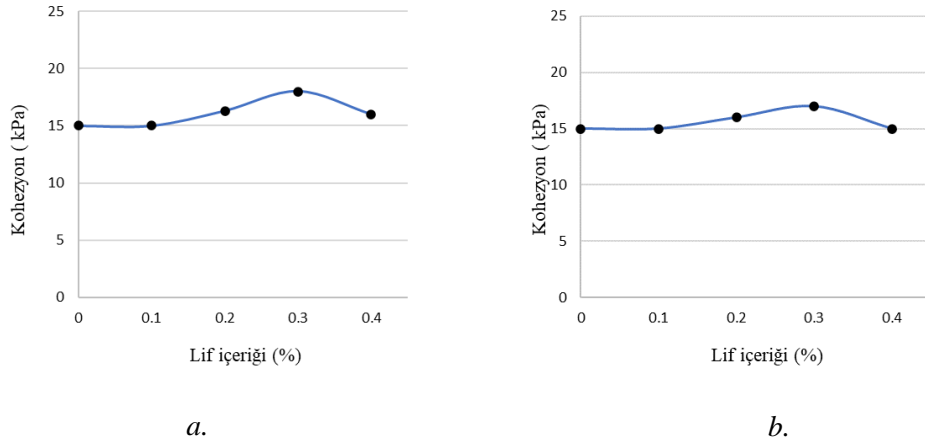
Kesme kutusu deney sonuçlarından elde edilen lifler ile güçlendirilmiş numunelerin içsel sürtünme açısı ve kohezyonu sırasıyla Şekil 10 ve 11'de gösterilmektedir. Bu grafiklerin yatay eksenini numunenin lif içeriğini göstermektedir. Sıfır lif içeriği, güçlendirilmemiş numuneleri gösterir. Bu deneylerin sonuçları, lif ile güçlendirilmiş kumun sürtünme açısını ve kohezyonunu artırdığını göstermektedir. Güçlendirilmiş kumun asıl kazandığı kayma direnci içsel sürtünme açısından dolayıdır ve kohezyon üzerinde ihmal edilebilir miktarda etki sağlamaktadır.

Her iki lif uzunluğunda, lif içeriğinin %0,3'e kadar artırılmasının hem sürtünme açısını hem de kohezyonu arttırdığı ancak lif içeriğindeki daha fazla artışın hem sürtünme açısını hem de kohezyonu azalttığı görülmektedir. Saf kumun sürtünme açısı 27,7 derece ve kohezyonu 15 kPa iken, güçlendirilmiş kumun maksimum sürtünme açısı 40,7 dereceye, kohezyon ise 18 kPa'a kadar yükselmiştir. İçsel sürtünme açılarını karşılaştırdığımızda %47'lik bir artış görülmektedir.

Belirli bir uzunluktan daha uzun lif kullanılması ve Belirli bir lif içeriğinden daha fazla lif kullanılması zeminin kayma mukavemetini artırmamıştır. Bu da lif uzunluğunun ve içeriğinin bir optimum değerinin olduğuna işaret etmektedir. Literatürde bu sonuca benzer sonuçlar bulunmuştur (Al-Refeai, 1991; Al-Refeave Al-Suhaibani, 1998; Al- Adili vd., 2012). Bu husus bu çalışmanın diğer çalışmalara uyumlu olduğunu göstermektedir.



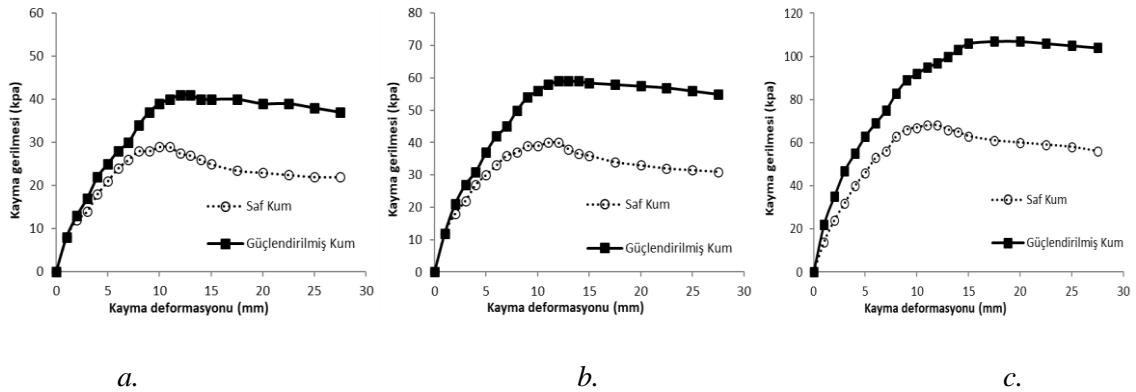
**Şekil 10:**  
Lifin içeriğinin kumun içsel sürtünme açısı üzerindeki etkisi  
a. Lif uzunluğu= 30 mm b. Lif uzunluğu= 40 mm



**Şekil 11:**  
Lifin içeriğinin kumun kohezyonu üzerindeki etkisi  
**a.** Lif uzunluğu= 30 mm **b.** Lif uzunluğu= 40 mm

### 3.3. Kayma Gerilmesi- Kayma Deformasyonu İlişkisi

25, 50 ve 100 kPa normal gerilmeler altında saf kum ve güçlendirilmiş numunelerin Kayma Gerilmesi- Kayma Deformasyonu ilişkisi incelenmiştir. Şekil 12'de Saf kumun davranışı lif içeriği %0,3 ve lif uzunluğu 30 mm olan numuneler ile karşılaştırılmıştır.



**Şekil 12:**  
Farklı normal gerilmeler altında saf kum ve lif içeriği %0,3 ve lif uzunluğu 30 mm olan numunelerin kayma gerilmesi- kayma deformasyonu ilişkisi  
**a.** 25 kPa normal gerilme, **b.** 50 kPa normal gerilme, **c.** 100 kPa normal gerilme

Şekil 12'de, saf kumun kesme davranışının nispeten gevrek olduğu görülebilir, çünkü kırılmadan sonra kayma gerilmesi azalıyor. Daha önceki araştırmalarda bildirildiği gibi, lifler ile güçlendirilmiş numuneler daha sünek davranışa sahiptir. Şekil 12'de gösterildiği gibi, lifle güçlendirilmiş numuneler, kırılmadan sonra önemli bir mukavemet kaybı göstermemektedir. Bu deneylerin sonucu diğer çalışmaların bulgularıyla uyumludur (Chegenizadeh ve Nikraz, 2012; Yetimoglu ve Salbas, 2003; Krishna ve Nasr, 2014).

#### 4. SONUÇLAR

Bu araştırmada, FRP lifleri ile güçlendirilmiş siltli kumun kayma mukavemetini incelemek için büyük ölçekli kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Bu- deney sonuçlarına dayanarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Lifler ile güçlendirilmiş kumun kayma mukavemeti, lif ilavesi nedeniyle iyileşmiştir. Kumun kayma mukavemeti parametreleri olarak, içsel sürtünme açısı ve kohezyon incelenmiştir. Saf kumun içsel sürtünme açısı 27,7 derece ve kohezyonu 15 kPa iken, güçlendirilmiş kumun maksimum sürtünme açısı 40,7 dereceye, kohezyon ise 18 kPa'a kadar yükselmiştir. İçsel sürtünme açılarını karşılaştırdığımızda %47'lik bir artış görülmektedir. Kohezyon da ise ihmal edilebilir bir artış söz konusudur.

Kayma direnci, lif içeriği ve lif uzunluğundaki artışla doğrusal olmayan bir şekilde artmaktadır. Kuma eklenen lif miktarı ile kayma mukavemetindeki artış arasındaki ilişki önce artmakta, daha sonra maksimum değere ulaştıktan sonra azalmaktadır. Her iki lif uzunluğu için maksimum kayma direnci %0,3 lif içeriğinde elde edilmiştir. %0,3 lif içeriğinden sonra lif artışıyla birlikte kayma direnci artış göstermemektedir. Dolayısıyla %0,3 lif içeriği, optimum lif içeriği olarak kabul edilmektedir. Lif uzunluğu açısından değerlendirildiğinde aynı lif içerikleri için 30 mm'lik liflerden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Dolayısıyla bu çalışma optimum lif içeriği miktarı ve lif uzunluğu sırasıyla %0,3 ve 30 mm olarak elde edilmektedir. Optimum lif içeriğinden daha fazla ve optimum uzunluktan daha uzun lif kullanılmasındaki verimsizlik, lifin topaklanmalarına ve düzensiz dağılmasına ile ilgili olabilir.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

#### YAZAR KATKISI

Saeid Zardari çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fikrinsel içeriğin eleştirel incelenmesi ile son onay ve tam sorumluluk; Amir Shahkar ve Pegah Dadras makale taslağının oluşturulması ile son onay ve tam sorumluluk yönünden katkı sağlamışlar.

#### KAYNAKLAR

1. Al-Adili, A.; Azzam, R.; Spagnoli, G. ve Schrader, J. (2012) Strength of soil reinforced with fiber materials (Papyrus), *Soil Mech. Found. Eng.*, 48(6), 241-247, doi: 10.1007/s11204-012-9154-z
2. Al-Refeai, T. (1991) Behavior of granular soils reinforced with discrete randomly oriented inclusions, *Geotextile and Geomembranes*, 10(3), 319-333, doi:10.1016/0266-1144(91)90009-L
3. ASTM D2487-11, (2011) Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA, Available online: <http://www.astm.org/Standards/D2487.htm>
4. ASTM D3080, (2004) Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, Available online: <https://www.astm.org/Standards/D3080.htm>

5. ASTM D4318-17, (2016) Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, Available online: <http://www.astm.org/Standards/D4318.htm>
6. ASTM D422-63, (2016) Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, Available online: <http://www.astm.org/Standards/D422.htm>
7. ASTM D698-12e2, (2012) Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM International, West Conshohocken, PA, Available online: <http://www.astm.org/Standards/D698.htm>
8. ASTM D854-14, (2014) Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, Available online: <http://www.astm.org/Standards/D854>
9. Chegenizadeh, A. ve Nikraz, H. (2012) Performance of fiber reinforced clayey sand composite, *Front. Struct. Civ. Eng.*, 6(2): 147–152, doi: 10.1007/s11709-012-0158-6
10. Claria, J.J. ve Vettorelo, P.V. (2016) Mechanical behavior of loose sand reinforced with synthetic fibers, *Soil Mech. Found. Eng.*, 53(1), 12-18, doi: 10.1007/s11204-016-9357-9
11. Darby, J.J. (1999) Role of bonded fiber-reinforced composites in strengthening of structures. Strengthening of reinforced concrete structures Using Externally-Bonded FRP composites in structural and civil Engineering, wood head publishing, Cambridge, UK.
12. Dean, R., Freitag, F. (1986) Soil Randomly Reinforced with Fibers, *Journal of Geotechnical Engineering*, 112\_ 8\_ 820-826,
13. Hoare, D. (1979) Laboratory study of granular soils reinforced with randomly oriented discrete fibers, *Int. Conf. on Use of Fabrics in Geotech*, Paris, France, 1, pp 47-52.
14. Krishna Rao, S.V ve Nasr, A.M.A. (2014) Laboratory study on the relative performance of silty sand soils reinforced with linen fiber, *Geotech. Geol. Eng.*, 30,63–74, doi:10.1007/s10706-011-9449-2
15. Kumar, R., Kanaujia, V.K., Chandra, D. (1999) Engineerig Behaviour of Fibre-Reinforced Pond Ash and Silty Sand, *Geosynthetics International*, 6\_ 6\_ 509-518. <https://doi.org/10.1680/gein.6.0162>
16. Li, J.; Tang, C.; Wang, D.; Pei, X. ve Shi, B. (2014) Effect of discrete fibre reinforcement on soil tensile strength, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(2), 133–137, doi: 10.1016/j.jrmge.2014.01.003
17. Nataraja, M. S., ve McManis, K. L. (1997). Strength and Deformation Properties of Soils Reinforced Fibriliated Fibers, *Geosynthetics International*, 1\_ 65-79. <https://doi.org/10.1680/gein.4.0089>
18. Noorzad, R.; ve Zarinkolaei, S.T.G. (2015) Comparison of mechanical properties of fiber-reinforced sand under triaxial compression and direct shear, *Open Geosci.*, 1, 547–558, doi:10.1515/geo-2015-0041
19. Ouria, A. ve Zardari, S. (2017) Effect of the length and content of fibers on the shear strength of randomly distributed fiber-reinforced soil, *Journal Of Transportation Infrastructure Engineering (JTIE)*, Volume 3, Number 1 (9) #L0076; Page(S) 99 To 110. <https://dx.doi.org/10.22075/jtie.2017.1469.1118>
20. Sadek, S.; Najjar, S. ve Freiha, F. (2010) Shear strength of fiber-reinforced sands, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 136(3), 490-499, doi:10.1061/\_ASCE\_GT.1943-5606.0000235

21. Sariosseiri, F. ve Muhunthan, B. (2009) Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils, *Engineering Geology*, 104(1-2), 119-125. doi:10.1016/j.enggeo.2008.09.003
22. Shukla, S.K.; Shahin, M.A. ve Abu-Taleb, H. (2015) A note on void ratio of fibre-reinforced soils, *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng.*, 1(29), 1-5, doi:10.1007/s10706-012-9593-3
23. Wang Y., Guo P., Shan Sh., Yuan H ve Yuan B., (2016) Study on the strength influence mechanism of fiber reinforced expansive soil using jute,” *Geotech. Geolog. Eng.*, vol. 34, pp. 1079, doi:10.1007/s10706-016-0028-4
24. Yetimoglu, T. ve Salbas, O. (2003) A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers, *Geotext. Geomembranes*, 21 (2003) 103–110, doi:10.1016/S0266-1144(03)00003-7