



Bazalt fiber kullanımının düşük plastisiteli kilin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi

The effect of basalt fiber use on the unconfined compressive strength of low plasticity clay

Zülfü GÜROCAK¹ , Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU^{*1} 

¹ Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 29119, Elazığ

• Geliş tarihi / Received: 14.4.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 13.06.2023

Öz

Düşük dayanıma sahip killerin dayanımlarını artırmak amacıyla yapılan ve stabilizasyon olarak adlandırılan güçlendirme işlemlerinde farklı katkı malzemeleri kullanılmaktadır. Bu malzemelerden en yaygın olarak kullanılanları ise fiberlerdir. Son yıllarda, maliyetlerinin düşük, dayanımlarının yüksek ve kolay ulaşılabilir olmalarından dolayı zeminlerin güçlendirilmesinde fiberlerin kullanılması, geleneksel kimyasal stabilizasyon yöntemlerine bir alternatif olarak araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Farklı türleri olan fiberlerden bazalt fiberlerin kullanımı ekonomik ve çevreci olmaları nedeniyle artmaktadır. Bu çalışmanın amacı, bazalt fiberin kaolin kilinin dayanımı üzerindeki etkisini araştırmaktır. Farklı oranlarda (kuru ağırlıkça %0, 1, 2 ve 3) bazalt fiberin farklı su içeriklerindeki (%20, 25, 30 ve 35) zemine eklenmesiyle zeminin dayanımında meydana gelen değişimleri incelemek için serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonrasında kile %25 oranında su ve %1 oranında bazalt fiber eklenmesi sonucu serbest basınç dayanımının maksimum olduğu belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre başarılı bir güçlendirmede fiber oranı ile birlikte su oranı da büyük bir etkiye sahiptir.

Anahtar kelimeler: Bazalt fiber, Dayanım, Güçlendirme, Kaolin kili

Abstract

Different additives are used in reinforcement processes, called stabilization, which are made to increase the strength of low strength clays. Fibers are the most widely used of these materials. In recent years, the use of fibers in the reinforcement of soils has attracted the attention of researchers as an alternative to traditional chemical stabilization methods, due to their low cost, high strength and easy accessibility. The use of basalt fibers, which are different types of fibers, is increasing due to their economic and environmental friendliness. The aim of this study is to investigate the effect of basalt fiber on the strength of kaolin clay. In order to examine the changes in the strength of the soil by adding basalt fiber in different proportions (0, 1, 2 and 3 % by dry weight) to the soil with different water contents (20, 25, 30 and 35%), unconfined compressive tests were carried out. After the experimental studies, it was determined that the unconfined compressive strength was maximum as a result of the addition of 25% water and 1% basalt fiber to the clay. According to the results of the study, the fiber ratio and the water ratio have a great effect on a successful reinforcement.

Keywords: Basalt fiber, Strength, Reinforcement, Kaolin clay

*Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU; yaslan@firat.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Günümüzde hızlı teknolojik ilerleme ve gereksinimlerin değişimine bağlı olarak yeni mühendislik malzemeleri de farklı kullanım alanlarında hızlı bir şekilde yerini almaktadır. Bu gereksinimin nedeni ise günümüz modern teknolojilerinin geleneksel metal, seramik ve polimer malzemeler tarafından karşılanamayan, farklı özelliklere sahip olan malzeme ihtiyacıdır. Bu ihtiyaç, kullanımda olan klasik ürünlere göre daha üstün mühendislik özelliklere ve yüksek performansa sahip yeni teknolojik ürünlerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Fiberler, [Ekinciöğlü \(2003\)](#) tarafından doğal olarak bulunabilen ya da insanlar tarafından üretilen, bir boyutu diğer boyutundan çok büyük olan, aynı malzemenin daha büyük şekline göre daha yüksek dayanım ve elastisite modülüne sahip olan malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Son dönemlerde birçok farklı alanda kullanım yerine sahip olan fiberlerin doğal ve yapay olmak üzere iki türü bulunmaktadır. Doğada hazır halde bulunan doğal fiberler, bitkisel, hayvansal ve madensel olmak üzere üç türdür. Doğal fiber gruplarına göre maliyetleri yüksek olsa da, dayanımlarının yüksek, hafif, esnek olmaları ve çevresel etkilere karşı dirençli olmaları nedeniyle günümüzde en yaygın kullanıma sahip olan fiber grubu ise yapay fiberlerdir ve katkı maddeleri eklenerek insanoğlu tarafından üretilirler ([Aral, 2006](#)). Bu gruba dahil olan en önemli fiberler cam fiberler, polimer fiberler ve günümüzde kullanım alanı yaygınlaşan bazalt fiberlerdir.

Artan çevresel kaygılar ve maliyetler, daha çevreci, ekonomik, hammadde ulaşılabilirliği kolay ve üstün özelliklere sahip yeni ürünlerin elde edilmesini gerekli kılmıştır. Bu ürünlerden birisi olan fiberler, geçmişten günümüze değin hem türleri, hem de kullanım alanları değişen, gelişen ve kullanım alanları genişleyerek devam eden ürünlerdir. Çok geniş bir kullanım alanına sahip olan fiberlerin jeoteknik uygulamalardaki kullanımını ise insanlık tarihi kadar eskidir. Geçmiş dönemlerde doğadan alınan bitkisel ve hayvansal lifler kerpiç veya tuğla gibi yapı malzemelerinin dayanımını artırmak için kullanılmıştır. Daha sonra gelişen teknoloji ile doğal liflerin yerine cam, karbon, sentetik polimer fiber türleri veya plastik atıklar tercih edilmeye başlanmış, bu tür fiberlerin zeminlerin güçlendirilmesinde kullanımı konusunda yapılan çalışmalar da ([Consoli vd., 2002](#); [Yetimoglu & Salbaş, 2003](#); [Tang vd., 2007](#); [Abdi vd., 2008](#); [Ahmad vd., 2010](#); [Diambra vd., 2010](#); [Zaimoglu, 2010](#); [Estabragh vd., 2011](#); [Kinjal vd., 2012](#); [Pradhan vd., 2012](#); [Edinçliler & Çağatay, 2013](#); [Botero vd., 2015](#); [Roustaei vd., 2015](#); [Behbahani vd., 2016](#); [Eskişar vd., 2016](#); [Orakoglu & Liu, 2017](#); [Amini & Noorzad, 2018](#); [Cui vd., 2018](#); [Al-Bared vd., 2019](#); [Lee vd., 2019](#); [Fındıkçı, 2020](#); [Bao vd., 2021](#); [Valipour vd., 2021](#); [Wang vd., 2021](#)) hız kazanmıştır.

Malzeme mühendisleri tarafından kullanıma sunulan fiber türlerinden birisi de bazalt kayasından üretilen bazalt fiberlerdir. Bazalt, insanlık tarihi boyunca kullanılmış olan ve kullanılmaya devam eden önemli bir doğal yapı malzemesidir. Bazalt türü kaya günümüzde özellikle inşaat sektöründe birçok alanda yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Özellikle volkanik alanlarda oldukça yaygın bir şekilde yüzeyleme veren ve kolay erişimi ile birlikte dayanımlı olması nedeniyle tercih edilen bazalt, günümüzde teknolojik gelişmelere bağlı olarak kullanıma sunulan ve kullanımı gün geçtikçe artan bazalt fiberin de hammaddesidir. Ucuz olması, bol miktarda bulunması, çekme dayanımının ve kimyasal direncinin yüksek olması, mantar ve mikroorganizma etkisine karşı dirençli ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı olması, hammaddesi olan bazalt kayacının çok geniş alanlarda yüzeyleme veriyor olması ve üretiminde herhangi bir katkı maddesine gereksinim duyulmaması gibi özellikleri nedeniyle bazalt fibere olan ilgi giderek artmaktadır.

Bazalt fiber konusunda yapılan çalışmalara bakıldığında, bu çalışmaların birçoğunun bazalt fiber ile zemin güçlendirme ve optimum bazalt fiber boyu-katkı oranı konusunda olduğunu görmek mümkündür. Nitekim [Gao vd., \(2015\)](#), kilde zemin dayanımının en yüksek olduğu bazalt fiber oranının %0.25 ve fiber boyunun ise 12 mm olduğunu, [Ndepete & Sert \(2016\)](#), siltli zeminde 24 mm uzunluğunda ve %1.5 oranında fiber katkısıyla dayanımda en yüksek değerlerin tespit edildiğini, [Özdemir vd., \(2016\)](#), kaolin kilinde %1 bazalt fiber ve %9 kireç katkısının kullanıldığı örnekte 28 günlük kür uygulamasından sonra katkısız örneğe göre dayanımın 5.5 kat arttığını ifade etmektedirler. [Yixian vd., \(2016\)](#), şişen zeminin %6 kireç içeriği ve %0.3 fiber içeriği ile katkısız zemine göre 5.7 kat daha fazla dayanım gösterdiğini, [Gisymol & Ramya \(2017\)](#) ise organik zeminde, zemin dayanımındaki en büyük artış oranının 10 mm boyundaki fiberin %0.05 oranında katılmasıyla ve 28 günlük kürden sonra meydana geldiğini belirlemişlerdir. [Boz vd. \(2018\)](#), zeminde en büyük dayanım artışının 90 günlük kürden sonra %9 kireç içerikli 19 mm uzunluğunda %0.75 bazalt fiber kullanılarak elde edildiğini, [Kenan & Özocak \(2018\)](#) ise siltli bir zeminde %1.5 fiber katkısının en uygun oran olduğunu belirtmektedir. [Ma vd., \(2018\)](#), zeminde %10 uçucu kül, %8 kum ve % 0.4 bazalt fiber içerikli seçilmiş karışımlarda maksimum serbest basınç dayanımı ve optimum dayanım büyüme hızının elde edildiğini ifade ederken, [Pandit](#)

vd., (2018), bazalt fiberin %4 oranında kullanılmasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin arttığını, optimum su içeriği değerinin ise azaldığını belirtmektedir. Cao vd., (2019) zeminin serbest basınç dayanımı değerinin çimento-uçucu kül katkısıyla %0.6 oranında bazalt fiber ilavesiyle en yüksek değere ulaştığını belirlemiştir. Ocakbaşı (2019) ise %2 oranında ve 24 mm boyunda bazalt fiber katkısıyla hazırlanan örneklerde en yüksek dayanım değerlerinin elde edildiğini ifade etmektedir. Sungur vd., (2021), killi bir zeminde bazalt fiber boyunun 15 mm'ye kadar artmasıyla kayma dayanımının arttığını, ancak daha büyük fiber uzunluklarında kayma dayanımının azaldığını belirtmektedir.

Fiber kullanımının çok eski olmasına karşın, yapay fiber kullanımı oldukça yenidir ve özellikle betonda katkı malzemesi olarak kullanılarak betonun bazı özellikleri iyileştirilmektedir. Ancak zemin stabilizasyonunda fiber kullanımı daha güncel bir uygulama olup, bu konudaki çalışmalar da gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmanın amacı düşük plastisiteli kaolin kiline uzunluğu 24 mm olan bazalt fiberin farklı oranlarda eklenmesiyle zeminin dayanımında meydana gelen değişimleri ve maksimum dayanımı sağlayan optimum fiber oranı ve su miktarını belirlemektir. Böylelikle zemin güçlendirmede bazalt fiberin kullanımı ve önemi vurgulanarak veri tabanının gelişmesine katkı sağlanacaktır.

2. Materyal ve metod

2. Material and method

2.1. Kaolin kili

2.1. Kaolin clay

Kaolin; başta granit ve diğer magmatik/volkanik kayaların yerinde bozunmaları sonucu oluşan ve ana minerali kaolinit olan bir kil grubudur. M.Ö. 3000 yıllarında Kau-Ling" isimli bir Çinli tarafından ilk defa Çin'in Jiangxi bölgesinde bulunmuş ve adı kayaç ismi olarak verilmiştir. Çoğunlukla literatürde, kaolin ve kil aynı anlamı verecek şekilde kullanılmaktadır. Kaolin, tane boyutu çok küçük ($2\mu\text{m}$), yumuşak, beyaz renkli ve plastik bir kil türüdür. Kaolin hammaddesini oluşturan en önemli mineral kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) olup; alüminyum hidrosilikat bileşimli bir kil mineralidir Kaolinin sertliği 1.5-2 aralığında değişim göstermekte ve yoğunluğu 2.62 g/cm^3 'tür. Kalsine edilmiş kaolinin sertliği 6-8 arasında, kırılma indisi 1.62 ve yoğunluğu ise 2.63 g/cm^3 'tür. Kaolinitin ideal kimyasal bileşimini % 46.5 SiO_2 , % 39.5 Al_2O_3 ve % 14.0 H_2O oluşturmaktadır. Kaolin $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de higroskopik suyunu kaybetmekte, $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de ise mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$) ve silise (SiO_2) dönüşmektedir (MTA, 2023).

Deneysel çalışmalarda, Balıkesir-Sındırgı (Türkiye) kil ocağında üretilen katkısız kaolin kili kullanılmıştır (Şekil 1). Çalışmada kullanılan kile ait kimyasal analiz sonuçları kilin alındığı firmadan temin edilmiş ve Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan kaolin kili
Figure 1. The kaolin clay used in the study

Tablo 1. Kaolin kilinin kimyasal özellikleri
Table 1. Chemical properties of kaolin clay

Anaoksit	%
SiO ₂	69.00
Al ₂ O ₃	12-17
Fe ₂ O ₃	0.50
CaO	0.10
Na ₂ O	0.20
K ₂ O	≤13.17
TiO ₂	Eser
SO ₃	≤7.05
Cr ₂ O ₃	0.01
BaO	Eser

2.2. Bazalt fiber

2.2. Basalt fiber

Bazalttan fiber elde etme fikrini ilk defa ortaya atan ve 1923'te ABD patentini alan kişi Fransız Paul Dhé'dir (Saravanan, 2006). İlk bazalt fiber fabrikası ise 1985 yılında Kiev yakınlarında üretime başlamıştır (Jamshaida & Mishraa, 2015). Bazalt fiber, koyu renkli, ince taneli, volkanik bir kayaç olan ve bazalt adı verilen doğal malzemeden elde edilmektedir. Dünya çapında yaygın bir şekilde bulunan sert ve yoğun bir kaya olan bazalt magmatik kökenlidir ve termo-plastik malzemeler gibi ısıtıldığında ergimektedir (Jamshaida & Mishraa, 2015).

Bazalt fiber, üretim mantığı birbirine benzer olan Junkers, santrifüj-çoklu rulo (Centrifugal-multiroll) ve eğirme (spinner) yöntemleri ile üretilmektedir. Junkers yönteminde kırıcıdan geçirilen bazalt kayacı yıkanır ve eritme potalarında yüksek sıcaklıkta ergitilir. 1450 °C'lik sıcaklığa ulaşan bazalt kaya eriyiği üç santrifüj başlıklı, bir hızlandırıcı ve iki fibrilize (fibrillizing) edici silindirden oluşan yatay şaftlı fiber eğirme makinesine iletilir. Burada kafalara yapışan eriyik, merkezkaç kuvveti nedeniyle uçar ve üfleme sonucunda viskoz sıvıdan uzunluğu 60-100 mm ve çapı 6-10 µm olan lifler oluşmaktadır (Czigany, 2007). Diğer bir yöntem olan Santrifüj-çoklu rulo (Centrifugal-multiroll) yönteminde ise Junkers yöntemine benzer şekilde eritilen bazalt kayacı dönen çarkların üzerine dökülür. Dönme hareketi nedeniyle yana doğru fırlatılarak bir sonraki çarkın yüzeyine dikey olarak akar. Stratejik olarak yerleştirilmiş diğer çarklar, tipik olarak yaklaşık 10 mikron çapında lifler üretilir (Basaltex, 2015).

Çalışmada kullanılan bazalt fiber, Spinteks Tekstil İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş'den temin edilmiş olup, 24 mm uzunluğundadır.

2.3. Deneysel çalışmalar

2.3. Experimental studies

Bu çalışma kapsamındaki laboratuvar çalışmalarında, örneklerin hazırlanmasından sonra, likit limit (LL), plastik limit (PL), standart proktor ve serbest basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar Fırat Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kaya-Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılmıştır.

2.3.1. Örnek hazırlama

2.3.1. Sample preparation

Bu tür çalışmalarda deney sonuçlarının sağlıklı olabilmesi, kil ile fiberin homojen bir karışım oluşturacak şekilde karıştırılarak örneklerin hazırlanmasına bağlıdır. Zemin-fiber karışımının homojen bir şekilde oluşturulabilmesi için en önemli parametrelerden bir tanesi de karıştırma yöntemidir. Mikser, mekanik, tamburlu karıştırıcı ve el ile karıştırma yöntemleri literatürde kullanılan yöntemlerdir. Bu çalışmada mikser yöntemi tercih edilmiştir. Örnek hazırlama safhasında kaolin kili ilk olarak 24 saat 105 °C'de etüvde kurutulduktan sonra önceden belirlenmiş miktarda kil, kuru halde iken kompresörle ayrıştırılmış olan bazalt fiber (Şekil 2) katkısıyla mikser kullanılarak karıştırılmıştır (Şekil 3).



Şekil 2. Çalışmada kullanılan ayrıştırılmamış (a) ve ayrıştırılmış (b) bazalt fiberler
Figure 2. Unseparated (a) and separated (b) basalt fibers used in the study



Şekil 3. Kil ve bazalt fiber karışımlarının hazırlanması
Figure 3. Preparation of clay and basalt fiber mixtures

Zemin ve bazalt fiberin tam ve homojen olarak karışmasını sağlamak için karıştırma işleminin süresi 10 dakika olarak seçilmiştir. Katkılı örnekler kuru örnek ağırlığının %20, 25, 30 ve 35'i olacak şekilde farklı su oranlarında ve %1, 2 ve 3 oranlarında bazalt fiber katkı oranlarına göre hazırlanmıştır. Bu tip çalışmalarda fiberin zemine karıştırılmasından sonra bu karışıma belirlenmiş olan oranda su eklenmektedir (Gao vd., 2015; Soğancı, 2015; Motiram vd., 2018; Tran vd., 2018; Liu vd., 2020). Bu çalışmada da kuru haldeki kile önceden belirlenen oranda bazalt fiber eklenerek karıştırılmış, mikserin karıştırma haznesine konulan bazalt fiber katkı örneğe distile su eşit olarak püskürtülmüş ve mikser ile karıştırılmıştır. Zaman zaman el ile de karıştırma yapılarak fiberlerin zemin içerisinde homojen dağılması ve fiber topaklanmasının mümkün oldukça minimum seviyede tutulmasına özen gösterilmiştir. Hazırlanan karışımlara ait su ve bazalt fiber oranları Tablo 2’de verilmiştir. Çalışmada kullanılan katkısız kaolin kili “K” ve bazalt fiber ise “BF” olarak gösterilmiştir.

Tablo 2. Deneysel çalışmalarda kullanılan karışımlara ait su ve bazalt fiber oranları
Table 2. Water and basalt fiber ratios of the mixtures used in experimental studies

Su oranı (%)	Örnek
20	K
	K + %1 BF
	K + %2 BF
	K + %3 BF
25	K
	K + %1 BF
	K + %2 BF
	K + %3 BF
30	K
	K + %1 BF
	K + %2 BF
	K + %3 BF
35	K
	K + %1 BF
	K + %2 BF
	K + %3 BF

K: Katkısız Kil, BF: Bazalt Fiber

2.3.2. Likit ve plastik limit deneyleri

2.3.2. Liquid and plastic limit tests

Laboratuvar çalışmalarının bu aşamasında, hazırlanmış olan katkısız kaolin kilinin LL ve PL değerlerini belirlemek için [ASTM D4318-17e1 \(2017\)](#) standardına göre 10 adet deney gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). Yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılarak katkısız kaolin kilinin plastisite indisi (PI) hesaplanmıştır. Deney sonuçlarına göre katkısız kilin ortalama LL değeri %45, PL değeri %24 ve PI değeri ise %21 olarak bulunmuştur. Çalışmada kullanılan kil Birleştirilmiş Zemin Sınıflamasına (UCSC) göre düşük plastisiteli (CL) kil sınıfındadır (Tablo 3).



Şekil 4. Likit (a) ve plastik (b) limit deneyleri

Figure 4. Liquid (a) and plastic (b) limit tests

Tablo 3. Kaolin kilinin likit ve plastik limit deney sonuçları

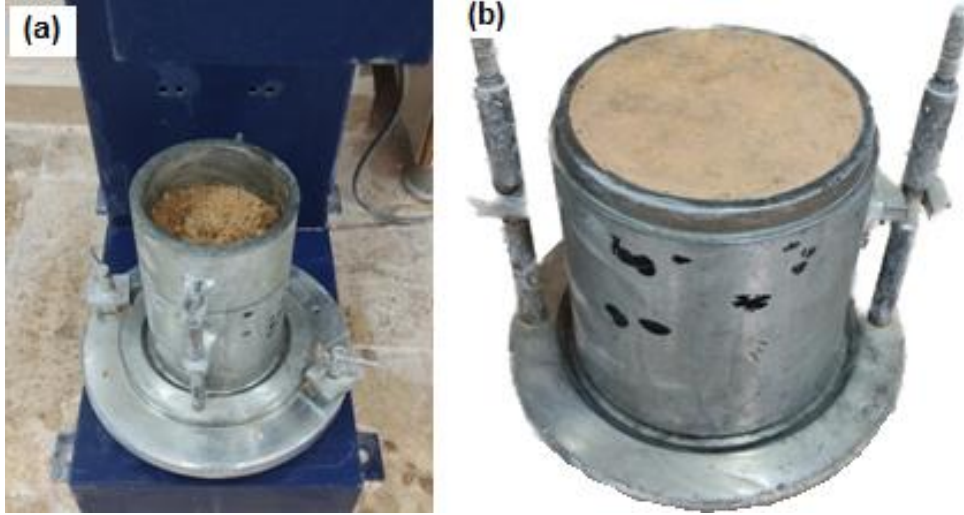
Table 3. The test results of liquid and plastic limit of kaolin clay

Özellik	Likit limit (%)	Plastik limit (%)	Plastisite indisi (%)	Zemin sınıfı (USCS)
Kaolin kili	45	24	21	CL

2.3.3. Kompaksiyon deneyleri

2.3.3. Compaction tests

DeneySEL çalışmaların bu aşamasında kile %20, 25, 30 ve 35 oranlarında su ve her bir su oranı için ayrı ayrı kuru ağırlıkça %0, 1, 2 ve 3 bazalt fiber eklenerek hazırlanmış 16 adet bazalt fiber katkılı örnekte [ASTM D698-12e2 \(2012\)](#) standardına göre toplam 32 adet standard proktor deneyi yapılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Standard proktor deneyinin yapılışı (a), deney sonucu sıkıştırılmış örnek (b)

Figure 5. Performing the standard proctor test (a), compressed sample as a result of the test (b)

Bu deney, 30.5 cm yükseklikten serbest düşmeye bırakılan 2.5 kg'lık yük altında zeminin üç tabaka halinde kalıp içerisine sıkıştırılması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Her bir su ve bazalt fiber oranı için yapılan proktor deneylerinden elde edilen sıkıştırılmış örneklerden serbest basınç deneyi için silindirik örnekler alınmıştır.

2.3.4. Serbest basınç deneyleri

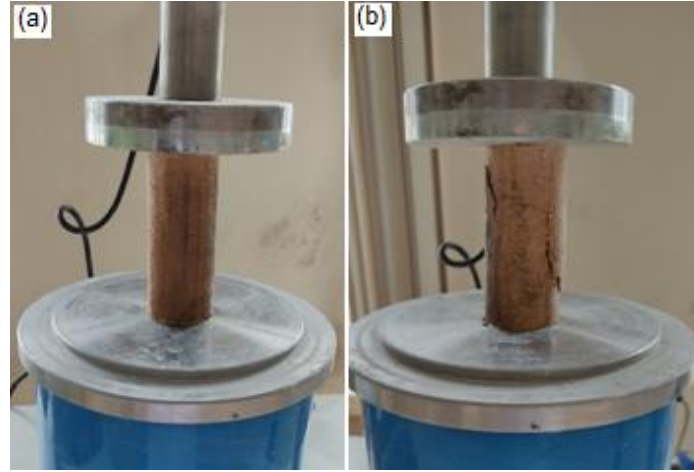
2.3.4. Unconfined compressive tests

Farklı su içeriğine sahip katkısız kil ile yine farklı su ve bazalt fiber oranlarında hazırlanan katkılı karışımlar proktor deneyi ile sıkıştırılmıştır. Bu örneklerden, serbest basınç deneylerinde kullanılmak üzere 76 mm boyunda, 38 mm çapında toplam 64 adet silindirik örnek alınmıştır. Bu örneklerde [ASTM D2166M-16 \(2016\)](#) standardına göre serbest basınç deneyleri yapılmış ve örneklerin serbest basınç dayanımları (q_u) belirlenmiştir (Şekil 6 ve 7).



Şekil 6. Serbest basınç deneyi için hazırlanmış bazalt fiber katkılı silindirik örnekler

Figure 6. Reinforced with basalt fiber cylindrical samples prepared for unconfined compressive test



Şekil 7. Serbest basınç deneyi öncesi örnek (a) ve deney sonrası yenilmiş örnek (b)
Figure 7. Sample before unconfined compressive test (a) and after test (b)

Serbest basınç deneyleri sonuçlarına göre farklı su içeriklerinde katkısız kilin dayanım değerinin 47.09-294.08 kPa arasında, bazalt fiber katkılı örneklerde ise 47.95-807.4 kPa arasında değiştiği belirlenmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. Güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş örneklerin ortalama q_u değerleri
Table 4. Average q_u values of unreinforced and reinforced samples

Su oranı (%)	Örnek	q_u (kPa)
20	K	102.4
	K + %1 BF	523.83
	K + %2 BF	685.31
	K + %3 BF	445.06
25	K	294.08
	K + %1 BF	807.4
	K + %2 BF	720.76
	K + %3 BF	705.00
30	K	96.07
	K + %1 BF	580.53
	K + %2 BF	630.23
	K + %3 BF	557.22
35	K	47.09
	K + %1 BF	51.89
	K + %2 BF	64.85
	K + %3 BF	47.95

K: Katkısız Kil, BF: Bazalt Fiber

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

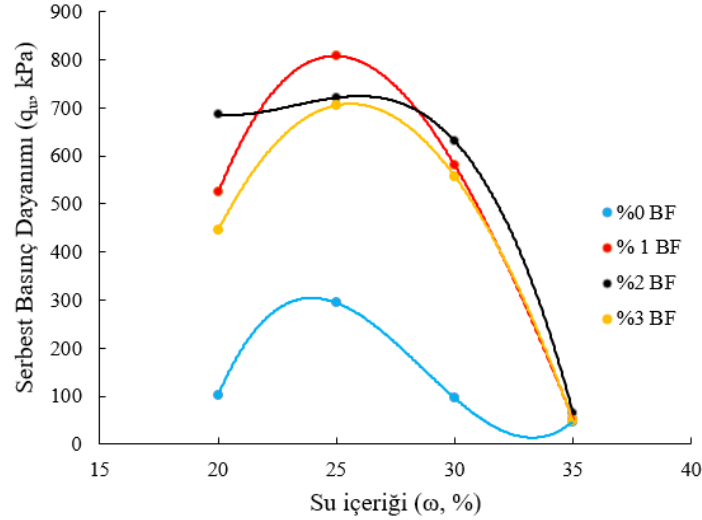
Bazalt fiber katkısı ile güçlendirilen killi zeminlerde dayanımdaki değişimler ile ilgili olarak yapılmış birçok çalışma mevcuttur (Gao vd., 2015; Özdemir vd., 2016; Boz vd., 2018; Cao vd., 2019; Ocakbaşı, 2019). Bu çalışmalara ait sonuçlar, killi zeminlerin serbest basınç dayanımındaki artışta su ve fiber oranı ile fiber boyunun etkili olduğunu göstermektedir. Farklı mühendislik özelliklerine sahip killerde maksimum dayanım artışının ortaya çıktığı su, fiber oranı ve boyunun da değiştiği görülmektedir.

Bu çalışmada düşük plastisiteye sahip kaolin kilinin optimum su ve bazalt fiber oranı gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile belirlenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar Tablo 4'te, örneklerin q_u değerlerindeki değişimlere ait grafik ise Şekil 8'de verilmiştir.

Tablo 4'e göre, %20, 25, 30 ve 35 su oranına sahip katkısız kilin q_u değerleri sırasıyla 102.4, 294.08, 96.07 ve 47.09 kPa olarak belirlenmiştir. Katkısız kilde en yüksek q_u değeri %25 su oranına sahip örnekte ortaya

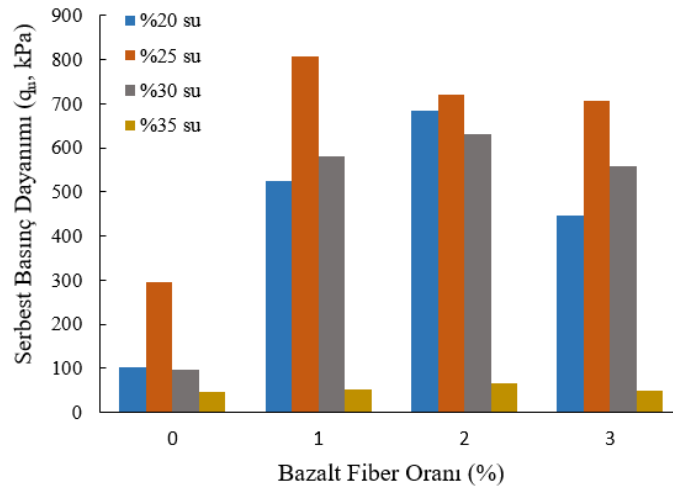
çıkıştır. %1 BF ile güçlendirilmiş örneklerin su oranındaki artışa bağlı olarak belirlenen q_u değerleri ise sırasıyla 523.83, 807.4, 580.53 ve 51.89 kPa'dır (Tablo 4). En yüksek q_u değeri %25 su oranına sahip olan örnekte tespit edilmiştir. %2 BF katkılı örneklerin q_u değerleri ise sırasıyla 685.31, 720.76, 630.23 ve 64.85 kPa'dır ve en yüksek q_u değeri %25 su oranına sahip örnekte belirlenmiştir. Bazalt fiber katkı oranının %3 olduğu örneklerde ise en yüksek q_u değeri su oranının %25 olduğu örnekte 705.00 kPa olarak bulunmuştur.

Bu sonuçlar kaolin kiline eklenen bazalt fiberin tüm su oranlarında q_u değerlerinde artışa neden olduğunu göstermektedir. Bu artışların belirlenmesinde katkısız kilin q_u değerleri referans olarak alınmıştır. Şekil 8'de görüldüğü gibi, örneklerdeki su oranı arttıkça hem katkısız kilde hem de bazalt fiberin farklı oranlarda eklenmesiyle hazırlanmış bütün örneklerde q_u değerlerinin artışı %25 su oranına kadar devam etmiş, su oranının artmasıyla q_u değerleri azalmaya başlamıştır. Su oranının %35 olması durumunda ise hemen hemen bütün bazalt fiber katkılı örneklerin q_u değerleri katkısız kilin q_u değerine yaklaşmıştır (Şekil 8).



Şekil 8. Örneklerde q_u değerlerinin bazalt fiber ve su oranına bağlı olarak değişimi
Figure 8. Change of q_u values in samples depending on basalt fiber and water ratio

Kile eklenen bazalt fiber oranı arttıkça tüm su oranlarında belli bir değere kadar q_u değerleri artış göstermiş, daha sonra ise azalmıştır. Şekil 9'da verilen grafik, %25 su oranında ve %1 BF katkılı örnekte q_u değerinin 807.4 kPa ile maksimuma ulaştığını göstermektedir.



Şekil 9. Farklı su oranlarında q_u -bazalt fiber oranı değişim grafiği
Figure 9. q_u -basalt fiber ratio change graph at different water ratios

Tang vd., (2007) killi bir zemine fiber eklenmesi ile fiber ve zemin parçacıklarının birbirleriyle etkileşime girdiğini ve birbirlerini sınırladığını belirtmektedir. Araştırmacıya göre zemindeki tek bir küçük fiber, zemin parçacıkları tarafından sarılmakta, zemin ve fiber parçacıkları birbiriyle temas ederek ara yüz kuvveti oluşturmaktadır. Bazalt fiber içeriği çok az olduğunda, fiber aralığı geniş olmakta, fiber-zemin kolonları arasındaki kesişim zorlaşmakta ve etkili bir fiber-zemin ağı oluşmamaktadır. Zemin dış kuvvete maruz kaldığında ise gerilme esas olarak saçılmış fiber-zemin kolonları ve zemin parçacıklarının kendi aralarındaki kuvvetler tarafından aktarılmakta ve taşınmaktadır. Fiber içeriği kademeli olarak arttığında, fiber aralığı azalmakta, bu da bitişik fiber-zemin kolonlarının etkili bir fiber-zemin ağı oluşturmak için kolayca kesişmesini sağlamaktadır. Böylece zemin dış kuvvete maruz kaldığında, kuvvet esas olarak fiber-zemin ağı ve zemin parçacıkları arasındaki kuvvetler tarafından taşınmaktadır. Gao vd., (2015) ise zemin içerisindeki fiber oranının fazla olması durumunda, fiberler arasında elektrostatik etkileşimin meydana geldiğini, fiberlerin kümeler halinde toplanarak zemin içerisinde eşit bir dağılımın olmadığını, bunun sonucu olarak da dayanımda azalmaların oluştuğunu belirtmektedir. Ayrıca su oranının artması sonucunda fiber ile zemin arasında meydana gelen etkileşim ve oluşan ara yüz kuvvetleri azalmakta ve sonuç olarak q_u değerleri azalmaktadır.

Bu çalışmada da bazalt fiber ile güçlendirilmiş örneklerin q_u değerlerinin bazalt fiber katkı ve su oranının artmasına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Nitekim deneysel çalışmalar sırasında bazalt fiber oranının artmasıyla yer yer bazalt fiber topaklanmalarının meydana geldiği ve bunun sonucunda rastgele dağıtılan bazalt fiberin kil ile homojen olarak karışmakta zorlandığı gözlemlenmiştir.

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla son yıllarda fiberler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazalt fiberler cam ve polimer fiberlere göre doğal olarak bulunması, daha çevreci, dayanımının yüksek, maliyetinin düşük, daha sürdürülebilir, yalıtım özelliğinin iyi olması gibi özelliklerinden dolayı bazalt fibere olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Bazalt fiberin zemin iyileştirmesinde ve zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri ile ilgili çalışmalar henüz geliştirilme aşamasındadır ve çalışmalar devam etmektedir. Dolayısıyla bu konuda yapılacak deneysel çalışmalar, zemin güçlendirmede bazalt fiber kullanımı konusunda veri tabanı oluşturması açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmada, bazalt fiber katkılı kaolin kilinde su ve bazalt fiber oranının q_u değerlerine olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Katkısız kaolin kilinin LL değeri %45, PL değeri %24 ve PI değeri %21 olarak bulunmuştur. Çalışmada kullanılan kil Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemine (USCS) göre düşük plastisiteli (CL) kil sınıfındadır.
2. Katkısız kil örneklerinde maksimum q_u değeri 294.08 kPa ile %25 su oranına sahip örnekte belirlenmiştir.
3. Katkısız ve güçlendirilmiş örneklerde q_u değerleri su oranının %25'e ulaşmasıyla maksimum değerlere ulaşmış, su oranının %30 olduğu örneklerde azalmaya başlamış ve su oranının %35 olması durumunda katkısız kilin q_u değerine düşmüştür. Su oranının artmasıyla birlikte fiber ve zemin arasında oluşan ara yüz kuvvetlerindeki azalmalara bağlı olarak zeminin dayanımı da azalmaktadır.
4. Bazalt fiber katkı oranına bağlı olarak q_u değerlerinde gözlenen değişimler su oranındaki ile benzerdir. En yüksek q_u değeri bazalt fiber oranının %1 olduğu örnekte ortaya çıkmıştır. Katkı oranının artışı ile birlikte q_u değerlerinde azalmalar oluşmuştur. Bazalt fiber oranının artması ile zemin içerisinde fiberler arasında meydana gelen elektromanyetik etkileşim ile fiberlerin belli bölgelerde bir araya gelmesi ve topaklanması dayanımın azalmasında rol oynamaktadır.
5. 24 mm boyundaki bazalt fiberin kullanıldığı bu çalışma, bazalt fiber katkısı ile güçlendirilmiş düşük plastisiteli killi zeminlerde optimum bazalt fiber oranının %1, su oranının ise %25 olduğunu göstermiştir. Bu oranlar kullanılarak güçlendirilmiş örneklerde en yüksek q_u değeri 807.40 kPa olarak belirlenmiştir. Bu değer katkısız kile ait q_u değeri ile karşılaştırıldığında, dayanımda meydana gelen artış oranının %175 olduğu görülmektedir.
6. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, bazalt fiber ile güçlendirilmiş düşük plastisiteli killerde maksimum dayanım artışını sağlayabilmek için bazalt fiber oranı ile birlikte su oranının da oldukça etkili olduğunu,

optimum oranların kullanılması halinde zemin dayanımının önemli sayılabilecek oranlarda artırılabilirliğini göstermektedir.

7. Yapılan deneysel çalışmalar, fiber kullanılarak yapılan güçlendirmelerde, başarılı bir sonucun elde edilebilmesi için, güçlendirilen killi zemin için optimum su oranı, fiber oranı ile birlikte, zemine eklenen fiberin homojen bir şekilde zemin içerisine dağıtılarak karıştırılmasının önemli olduğunu bir kez daha ortaya koymuştur.

Teşekkür / Katkı belirtme

Acknowledgement

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından MF.22.32 numaralı proje ile maddi olarak desteklenmiştir.

Yazar katkısı

Author contribution

Yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Abdi, M. R., Parsapajouh, A., & Arjomand, M. A. (2008). Effects of random fiber inclusion on consolidation, hydraulic conductivity, swelling, shrinkage limit and desiccation cracking of clays. *International Journal of Civil Engineering*, 6(4), 284-292.
- Ahmad, F., Bateni, F., & Azmi, M. (2010). Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres. *Geotextiles & Geomembranes*, 28(1), 93-99. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.09.017>
- Al-Bared, M. A. M., Harahap, I. S. H., Marto, A., Abad, S. V. A. N. K., & Ali, M. O. A. (2019). Undrained shear strength and microstructural characterization of treated soft soil with recycled materials. *Geomechanics and Engineering*, 18(4), 427-437. <https://doi.org/10.12989/gae.2019.18.4.427>
- Amini, P. F., & Noorzad, R. (2018). Energy-based evaluation of liquefaction of fiber-reinforced sand using cyclic triaxial testing. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104, 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.09.026>
- Aral, M. (2006). *Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı-bir optimum tasarım* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- ASTM D4318-17e1, (2017). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D698-12e2, (2012). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2166M-16, (2016). *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

- Bao, X., Huang, Y., Jin, Z., Xiao, X., Tang, W., Cui, H., & Chen, X. (2021). Experimental investigation on mechanical properties of clay soil reinforced with carbon fiber. *Construction and Building Materials*, 280, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122517>
- Basaltex (2015). The thread of stone. Retrieved from <http://www.basaltex.com>
- Behbahani, B. A., Sedaghatnezhad, H., & Changizi, F. (2016). Engineering properties of soils reinforced by recycled polyester fiber. *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 13(2), 01-07.
- Botero, E., Ossa, A., Sherwell, G., & Ovando-Shelley, E. (2015). Stress-strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET). *Geotextiles and Geomembranes*, 43(4), 363-369. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.04.003>
- Boz, A., Sezer, A., Özdemir, T., Hızal, G. E., & Azdeniz Dolmacı, O. (2018). Mechanical properties of lime-treated clay reinforced with different types of randomly distributed fibers. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(122), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3458-x>
- Cao, Z., Ma, O., & Wang, H. (2019). Effect of basalt fiber addition on static-dynamic mechanical behaviors and microstructure of stabilized soil compositing cement and fly ash. *Hindawi Advances in Civil Engineering*, 1-20. <https://doi.org/10.1155/2019/8214534>
- Consoli, N. C., Montardo, J. P., Prietto, P. D. M., & Pasa, G. S. (2002). Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(6), 462-472. [10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:6\(462\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:6(462))
- Cui, H., Jin, Z., Bao, X., Tang, W., & Dong, B. (2018). Effect of carbon fiber and nanosilica on shear properties of silty soil and the mechanisms. *Construction and Building Materials*, 189, 286-295. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.181>
- Czigany, T. (2007). Discontinuous basalt fiber-reinforced hybrid composites. *EXPRESS Polymer Letters*, 1, 59-60.
- Diambra, A., Ibraim, E., Wood, D. M., & Russell, A. R. (2010). Fibre reinforced sands: experiments and modeling. *Geotextiles & Geomembranes*, 28(3), 238-250. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.09.010>
- Edinçiler, A., & Cagatay, A. (2013). Weak subgrade improvement with rubber fibre inclusions. *Geosynthetics International*, 20(1), 39-46. <https://doi.org/10.1680/gein.12.00038>
- Ekinciöğlü, Ö. (2003). *Karma lif içeren çimento esash kompozitlerin mekanik davranışı: Bir optimum tasarım* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Eskişar, T., Karakan, E., & Altun, S. (2016). Effects of fibre reinforcement on liquefaction behaviour of poorly graded sands. *Procedia Engineering*, 161, 538-542. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.688>
- Estabragh, A. R., Bordbar, A. T., & Javadi, A. A. (2011). Mechanical behavior of a clay soil reinforced with nylon fibers. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(5), 899-908. <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9427-8>
- Fındıkçı, B. (2020). *Bentonit kilinin cam fiber ile iyileştirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Gao, L., Hu, G., Xu, N., Fu, J., Xiang, C., & Yang, C. (2015). Experimental study on unconfined compressive strength of basalt fiber reinforced clay soil. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2015/561293>
- Gisymol, P. G., & Ramya, K. (2017). A study on the effect of basalt fiber in organic soil. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 14(4), 13-17.
- Grim, R.E. (1968). *Clay mineralogy*. McGraw-Hill, New York.
- Jamshaid, H., & Mishra, R. (2015). A green material from rock: basalt fiber-a review. *The Journal of The Textile Institute*, 107(7), 923-937. <https://doi.org/10.1080/00405000.2015.1071940>
- Kenan, A., & Özocak, A. (2018). Bazalt fiber katkısının siltli zeminlerin kayma direncine etkisi. *2nd International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management*.

- Kinjal, S., Desai, A. K., & Solanki, C. H. (2012). Experimental study on the Atterberg limits of expansive soil reinforced with polyester triangular fibers. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(4), 636-639.
- Lee, S., Im, J., Cho, G. C., & Chang, I. (2019). Laboratory triaxial test behavior of xanthan gum biopolymer treated sands. *Geomechanics and Engineering*, 17(5), 445-452. <https://doi.org/10.12989/gae.2019.17.5.445>
- Liu, C., Lv, Y., Yu, X., & Wu, X. (2020). Effects of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of straw fiberreinforced soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(4), 581-590. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.03.004>
- Ma, Q. Y., Cao, Z. M., & Yuan, P. (2018). Experimental research on microstructure and physical-mechanical properties of expansive soil stabilized with fly ash, sand, and basalt fiber. *Advances in Materials Science & Engineering*, 2018, 1-13, <https://doi.org/10.1155/2018/9125127>
- Motiram, P. V., Rohit, C., Tushar, K., Ayushi, C., Bhushan, G., & Deepali, C. (2018). Study of basalt fiber on compaction characteristics of black cotton soil. *International Journal for Research in Engineering Application Management (IJREAM)*, 850-853.
- MTA-Maden Tetkik Arama. (2023, Haziran, 5). <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/img/kaolen.pdf>
- Ndepete, C. P., & Sert, S. (2016). Use of basalt fibers for soil improvement. *Acta Physica Polonica*, 130(1), 355-356.
- Ocakbaşı, P. (2019). *Bazalt fiber katkısının killi zeminlerin drenajsız kayma direncine etkisi* [Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Orakoglu, M. E., & Liu, J. (2017). Effect of freeze-thaw cycles on triaxial strength properties of fiber-reinforced clayey soil. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 21(6), 2128-2140. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0960-8>
- Özdemir, T., Polat, G. E., Azdeniz, O., Boz, A., & Sezer, A. (2016). Bazalt fiber ve kireç ile güçlendirilmiş kil zeminin dayanım özellikleri. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi*, 1025-1034.
- Pandit, V. M., Rohit, C., Tushar, K., Ayushi, C., Bhushan, G., & Deepali, C. (2018). Study of basalt fiber on compaction characteristics of black cotton soil. *6th International Conference on Recent Trends in Engineering & Technology (ICRTET)*, 850-853.
- Pradhan, P. K., Kar, R. K., & Naik, A. (2012). Effect of random inclusion of polypropylene fibers on strength characteristics of cohesive soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30, 15-25. <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9445-6>
- Roustaei, M., Eslami, A. & Ghazavi, M. (2015). Effects of freeze-thaw cycles on a fiber reinforced fine grained soil in relation to geotechnical parameters. *Cold Regions Science and Technology*, 120, 127-137. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.09.011>
- Saravanan, D. (2006). Spinning the rocks-basalt fibers. *Journal of the Institute of Engineers (India). Textile Engineering Division*, 86, 39-45.
- Seyhan, İ. (1971). Volkanik kaolin oluşumu ve andezit problemi. *Maden Tetkik Arama Enstitüsü*, 123-134, Ankara.
- Soğancı, A. S. (2015). The effect of polypropylene fiber in the stabilization of expansive soils. *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 9(8), 994-997.
- Sungur, A., Yazıcı, M. F., & Keskin, S. N. (2021). Bazalt lifi ile güçlendirilmiş killi zeminin mühendislik özellikleri üzerine deneysel araştırma. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Özel Sayı*, 28, 895-899. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1011881>
- Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F., & Cai, Y. (2007). Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(3), 194-202. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.11.002>
- Tran, K. Q., Satomi, T., & Takahashi, H. (2018). Effect of waste cornsilk fiber reinforcement on mechanical properties of soft soils. *Transportation Geotechnics*, 16, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.07.003>

- Valipour, M., Shourijeh, P. T., & Mohammadina, A. (2021). Application of recycled tire polymer fibers and glass fibers for clay reinforcement. *Transportation Geotechnics*, 27, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100474>
- Wang, S., Xue, Q., Ma, W., Zhao, K., & Wu, Z. (2021). Experimental study on mechanical properties of fiber-reinforced and geopolymer-stabilized clay soil. *Construction and Building Materials* 272(2021), 121914. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121914>
- Yetimoglu, T., & Salbas, O. (2003). A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers. *Geotextiles and Geomembranes*, 21(2), 103-110. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(03\)00003-7](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(03)00003-7)
- Yixian, W., Panpan, G., Shengbiao, S., Haiping, Y., & Binxiang, Y. (2016). Study on strength influence mechanism of fiber-reinforced expansive soil using jute. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34, 1079-1088. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-0028-4>
- Zaimoglu, A. S. (2010). Freezing-thawing behavior of fine-grained soils reinforced with polypropylene fibers. *Cold Regions Science and Technology*, 60(1), 63-65. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.07.001>