

Fiber takviyesi ile killi zeminlerin kıvam limitlerinde meydana gelen değişimler

Changes in the consistency limits of clay soils with fiber reinforcement

Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU*¹ , Zülfü GÜROCAK¹ 

¹Firat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ

• Geliş tarihi / Received: 26.01.2024

• Kabul tarihi / Accepted: 14.03.2024

Öz

Killerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. Bu geleneksel yöntemlere son yıllarda kullanımı giderek yaygınlaşan fiber ile güçlendirme yöntemi de eklenmiştir. Geleneksel yöntemlere göre birçok avantaja sahip olan bu yöntemde daha çok bazalt, cam, polipropilen gibi fiber türleri kullanılmakta ve dolguda kullanılan zeminlerin mühendislik özellikleri iyileştirilebilmektedir. Zemin güçlendirmede fiber kullanımının son zamanlarda mühendislik uygulamalarında yoğun bir şekilde kullanılmaya başlanması ile birlikte, bu konuda yapılan bilimsel çalışmalarda da önemli bir artış söz konusudur. Fiber takviyesi kullanılarak bugüne kadar yapılan çalışmalarda çoğunlukla zeminin dayanımında, şişme özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Ancak zeminin kıvam limitleri üzerinde fiberin etkisinin incelendiği çalışma oldukça azdır. Kıvam limitlerindeki değişim zemin stabilitesi üzerinde etkili olduğundan fiber takviyesiyle meydana gelen değişimlerin belirlenmesi oldukça önemlidir. Fiber kullanımı sonucunda fiber-zemin etkileşimlerinin, zeminin jeoteknik özelliklerinde meydana gelen değişimlerin ve bu değişimlerdeki mekanizmanın anlaşılabilmesi için daha fazla bilimsel çalışmaya ve veri tabanına ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, kaolin kiline farklı oranlarda bazalt fiber takviyesiyle likit ve plastik limit değerlerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Bu amaçla kaolin kiline % 0.25, 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50 ve 3.00 oranlarında 24 mm uzunluğa sahip bazalt fiber eklenerek hazırlanan kil örneklerinin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerlerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, bazalt fiber takviyesi ile kaolin kilinin likit limit değerlerinde azalma, plastik limit değerlerinde ise artış meydana gelmiştir. Takviyeli kaolin kilinde likit limitte en fazla azalmanın, plastik limitte ise en fazla artışın meydana geldiği bazalt fiber oranı ise % 2.00 olarak belirlenmiştir. Likit ve plastik limit değerlerinde meydana gelen bu değişimler sonucunda kaolin kilinin plastisite indisinde de azalma meydana gelmiş ve bu azalmaya bağlı olarak kaolin kili daha stabil hale gelmiştir.

Anahtar kelimeler: Bazalt fiber, Kaolin kili, Kıvam limitleri, Zemin güçlendirme

Abstract

There are many methods used to improve the engineering properties of clays. Fiber reinforcement method, which has become increasingly common in recent years, has also been added to these traditional methods. In this method, which has many advantages over traditional methods, fiber types such as basalt, glass and polypropylene are used and the engineering properties of the soils used in the filling can be improved. With the use of fiber in soil reinforcement being used intensively in engineering applications recently, there is also a significant increase in scientific studies on this subject. In the studies carried out so far using fiber reinforcement, changes in the strength and swelling properties of the soil have mostly been examined. However, there are very few studies examining the effect of fiber on the consistency limits of the soil. Since the change in consistency limits affects soil stability, it is very important to determine the changes that occur with fiber reinforcement. More scientific studies and databases are needed to understand the fiber-soil interactions, changes in the geotechnical properties of the soil and the mechanism of these changes as a result of fiber use. This study examined changes in liquid and plastic limit values by adding different amounts of basalt fiber to kaolin clay. For this purpose, the changes in the liquid limit, plastic limit and plasticity index values of the clay samples prepared by adding 24 mm long basalt fiber to kaolin clay at the rates of 0.25, 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50 and % 3.00 were examined. According to the results of the study, with basalt fiber reinforcement, there was a decrease in the liquid limit values of kaolin clay and an increase in the plastic limit values. The basalt fiber ratio with the highest decrease in the liquid limit and the highest increase in the plastic limit in reinforced kaolin clay was determined as 2.00 %. As a result of these changes in liquid and plastic limit values, the plasticity index of kaolin clay decreased and due to this decrease, kaolin clay became more stable.

Keywords: Basalt fiber, Kaolin, Consistency limit, Soil reinforcement

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

1. Giriş

1. Introduction

Problemlili zemin olarak tanımlanan zeminler yüksek su emme kapasitesine, düşük dayanıma, yüksek sıkışabilirliğe veya sıvılaşabilme özelliğine sahiptir. Jeoteknik özellikleri mühendislik projesine uygun olmayan bu tür zeminler farklı yöntemler kullanılarak iyileştirilmekte ve zeminin jeoteknik özellikleri istenilen düzeye getirilebilmektedir. Bu konuda günümüze değin kullanılagelmiş en geleneksel yöntem kimyasal stabilizasyondur. Bu yöntemde puzolanik özelliğe sahip farklı malzemeler kullanılmakta, killi zemine eklenen bu katkı malzemeleri ile killi zemin arasında puzolanik reaksiyon oluşmakta ve zemin özelliklerinde iyileşme sağlanmaktadır. Zeminin yerinde güçlendirilmesinde kullanılan en yaygın ve geleneksel yöntem ise enjeksiyon/jetgrouting yöntemi olup yüksek basınçla zemine enjekte edilen çimento şerbeti ile zemin güçlendirilmektedir. Bu geleneksel iyileştirme/güçlendirme çalışmaları ile birlikte son yıllarda dolgu zeminlerin güçlendirilmesi amacıyla farklı türdeki fiberlerin kullanımı ve bu konuda yapılan çalışmalar dikkat çekmektedir. Bu fiberlerden, polipropilen fiber (Diambra et al. 2010; Tang et al. 2007; Zaimoglu, 2010; Pradhan et al. 2012; Eskişar et al. 2016; Roustaei et al. 2015; Amini & Noorzad, 2018); naylon fiber (Estabragh et al. 2011); polyester fiber (Kinjal et al. 2012; Behbahani et al. 2016); cam ve bazalt fiber (Orakoglu & Liu, 2017); karbon fiber (Cui et al. 2018; Bao et al. 2021); kauçuk fiber (Edinçliler & Çağatay, 2013); polimer ve cam fiber (Valipour et al. 2021); bazalt fiber (Wang et al. 2021; Gürocak and Aslan Topçuoğlu, 2023) çeşitli çalışmalarda takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Doğal ve yapay olmak üzere iki ana gruba ayrılan fiberlerden günümüzde kullanımı giderek yaygınlaşan fiber türü, yapay bir fiber olan ve bazalt kayasından üretilen bazalt fiber (BF)'dir. Kolay erişilebilir, ucuz, oldukça fazla miktarda olması, yüksek çekme dayanımına ve kimyasal dirence sahip olması bazalt fiberin en önemli özelliklerindedir. Ayrıca bazalt fiber mikroorganizma ve mantarlara karşı oldukça dirençlidir. Zemin güçlendirmede kullanımı giderek yaygınlaşan BF'nin killi zeminlerin jeoteknik özelliklerine olan etkileri konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar, daha çok BF'nin killi zeminin dayanımına ve sıkışabilirliğine olan etkileri ile optimum BF oranı ve uzunluğu konusundadır (Gao et al. 2015; Pandit et al. 2018; Kale et al. 2020; Sungur et al. 2021; Gürocak ve Aslan Topçuoğlu, 2023; Aslan Topçuoğlu ve Gürocak, 2023; Aslan Topçuoğlu ve Gürocak 2024).

Zeminin kıvam limitleri üzerine etkilerinin incelendiği çalışma sayısı oldukça azdır. Bu çalışmalarda farklı jeoteknik özelliğe sahip killi zeminlerde farklı uzunluklara sahip BF kullanılmış ve elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Aravalli et al. (2017) tarafından 12 mm uzunluğunda ve farklı oranlarda BF takviyesinin killi zeminin likit limit (LL), plastik limit (PL), plastisite indeksi (PI), optimum su içeriği (w_{opt}), maksimum kuru birim ağırlık (γ_d), serbest basınç dayanımı (UCS) ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) gibi özelliklerine olan etkileri incelenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, BF uzunluğunun sabit olması ve oranın artmasıyla birlikte zeminin LL, PL ve PI değerleri azalmakta ve zemin daha az plastik özellik kazanmaktadır. Araştırmacılar, likit limit deneyi sırasındaki darbeler sonucunda bazalt fiberdeki statik kuvvetin sürtünme kuvvetine dönüştüğünü, bu şekilde zeminin kaymasına ve akmasına karşı direnç oluştuğunu, böylece zeminin kıvam limitlerinde azalmalar meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Chaudhary, (2021) farklı oranlarda (% 3, 6, 9, 12, 15) BF ile güçlendirdiği killi zeminin, LL değerinin % 9 BF oranına kadar azaldığını ve bu orandan sonra arttığını, PL değerinin ise % 12 BF oranına kadar arttığını bu orandan sonra ise azaldığını belirlemiştir. Çalışmacı fiberin zeminden su veya nemi emme eğilimine/özelliğine sahip olması nedeniyle LL'nin azaldığını, PL'nin ise arttığını, böylece zeminin daha stabil hale geldiği belirtilmiştir.

Khudhair et al. (2022) tarafından yapılan çalışmada düşük plastisiteli killi zemin BF ve çimento ile güçlendirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Araştırmannın sonuçlarına göre BF oranı arttıkça LL azalmakta, PL artmakta ve zeminin PI değeri azalarak, zemin daha az plastik bir özellik kazanmaktadır. Ancak LL, PL ve PI'deki bu değişimlerin çimentoya göre sınırlı olduğunun belirtildiği çalışmada, BF'nin zemin taneleri ile bağlantı köprüleri oluşturduğunu, BF bileşenlerinin zemine eklenen çimento ile etkileşimi sonucunda ise BF ile zemin taneleri arasındaki bağı arttırarak LL, PL ve PI'daki değişimleri daha fazla arttırdığını belirtmişlerdir.

Mukhtar and Kumar (2022), yüksek plastisiteli kil bir zemine eklenen 12 mm sabit uzunluktaki BF oranının artışıyla birlikte LL, PL ve PI değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar LL, PL ve PI'da meydana gelen bu azalmaların, LL deneyi sırasındaki darbeler nedeniyle BF'deki statik kuvvetinin sürtünme kuvvetine dönüşmesi ve oluşan sürtünme nedeniyle zeminin kayma ve akmaya karşı daha dirençli hale gelmesi sonucunda oluştuğunu ileri sürmüşlerdir.

Aishwarya and PriyaRachel (2023) BF takviyeli kumlu killi zeminin, LL ve PL’inde meydana gelen değişimleri inceledikleri çalışmada, BF oranının artmasına bağlı olarak güçlendirilmiş killi zeminin LL ve PL’sinin arttığını ve sonuçta PI’sının ise azaldığını belirlemişlerdir. Ancak, güçlendirilmiş killi zeminin LL, PL ve PI değerlerinde meydana gelen bu değişimlerin nasıl meydana geldiği konusunda herhangi bir fikir belirtmemişlerdir.

Günümüze değin yapılan çalışmalar göstermektedir ki bazalt fiber takviyeli zeminlerde kıvam limitlerinde meydana gelen değişimlerin daha fazla incelenmesi ve irdelenmesi gerekmektedir. Bu amaçla kaolin kili farklı oranlarda BF ile güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş örneklerin LL, PL ve PI değerlerindeki değişimler incelenmiştir. Böylece BF ile güçlendirilmiş killi zeminlerin plastisitesi üzerindeki etkileri konusunda literatüre katkı sağlaması ve veri tabanının geliştirilmesi hedeflenmiştir.

2. Deneysel materyal ve yöntemler

2. Experimental material and methods

2.1. Kaolin kili ve bazalt fiberin özellikleri

2.1. Properties of kaolin clay and basalt fiber

Deneysel çalışmalarda kil olarak kaolin kili, fiber türü olarak da BF seçilmiştir. Kaolin; volkanik/magmatik kayaların yerinde ayrışması ile meydana gelen alüminyum hidrosilikat bileşimli ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) bir kil grubudur. Plastik bir kil türü olan kaolin, beyaz renkli, yumuşak ve çok küçük tane boyutuna ($2 \mu m$) sahip olup yoğunluğu ise 2.62 gr/cm^3 ’tür (MTA, 2024). Bu çalışmada kullanılan kaolin kili Balıkesir - Sındırgı (Türkiye) kil ocağında üretilmekte (Şekil 1) olup ana oksit değerleri, kaolinin temin edildiği firmadan alınmış ve Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan kil
Figure 1. Clay used in experimental studies

Tablo 1. Çalışmada kullanılan kilinin ana oksit değerleri
Table 1. Main oxide values of the clay used in the study

Ana Oksitler (%)	Kaolin Kili
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
Kızdırma Kaybı	-

Deneyisel çalışmalarda güçlendirme malzemesi olarak kullanılan BF (Şekil 2), koyu renkli, çok küçük kristalli volkanik bir kayacın bazalttan üretilmektedir. Kimyasal olarak incelendiğinde bazaltı oluşturan ana bileşen SiO_2 , ikinci ana bileşen ise Al_2O_3 'tür. Bu iki ana bileşeni Fe_2O_3 , FeO , CaO ve MgO takip etmektedir (Jamshaid & Mishra, 2015). Bu çalışmada kullanılan BF 24 mm uzunluğunda olup BF satışı yapan firmadan alınmıştır. BF'nin mekanik ve fiziksel özellikleri ise fiberin alındığı firmadan temin edilmiş olup Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Deneyisel çalışmalarda takviye olarak kullanılan ayrılmamış BF
Figure 2. Unseparated BF used as reinforcement in experimental studies

Tablo 2. Çalışmada kullanılan BF'nin mekanik ve fiziksel özellikleri
Table 2. Mechanical and physical properties of BF used in the study

Özellik	Değer
Fiber boyu (mm)	24
Monofilament Çapı (μm)	$15 \pm 1,5$
Nem Oranı, Max (%)	2
Elastisite Modülü (GPa)	90
Çekme Dayanımı (MPa)	3000
Isıl İletkenlik (W/mK)	0.031-0.038
Kopma Uzaması (%)	3.5
Yoğunluk (g/cm^3)	2.63

2.2. Deneyisel çalışmalar

2.2. Experimental studies

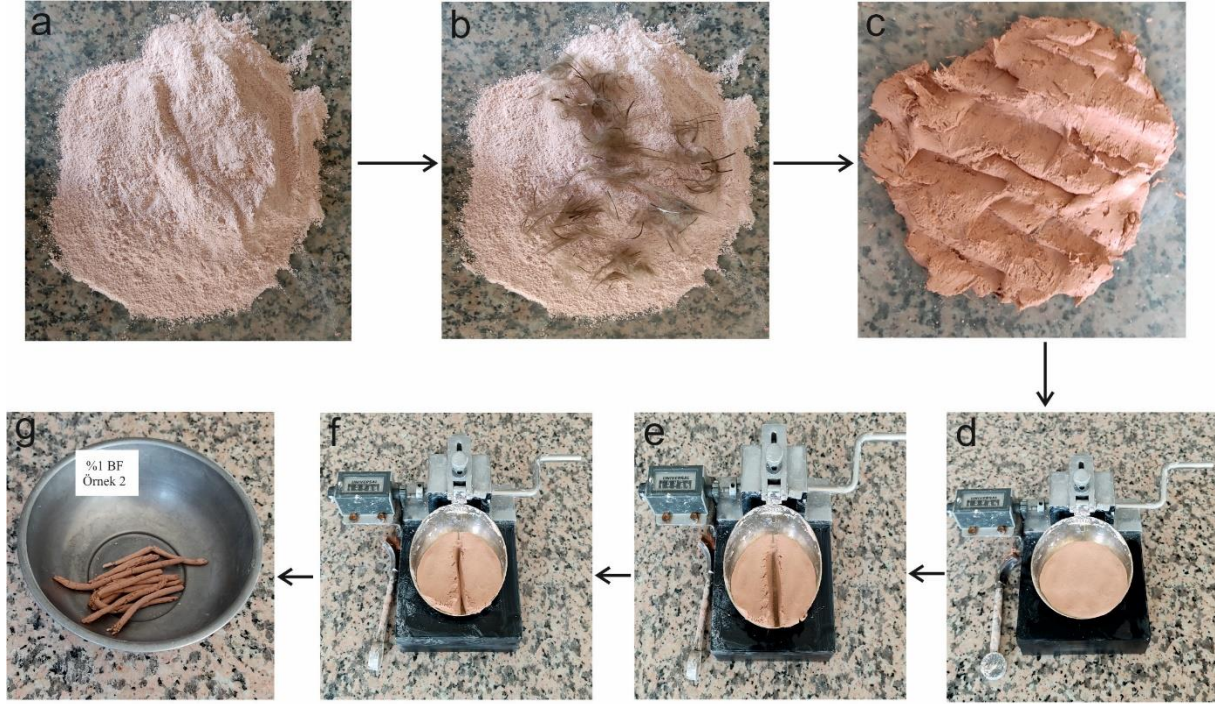
Deneyisel çalışmaların ilk aşamasında BF takviyeli örnekler hazırlanmıştır. $105\text{ }^\circ\text{C}$ 'de etüvde 24 saat süresince kurutulan kaolin kiline, kompresör yardımı ile ayrık hale getirilen (Şekil 3) BF kuru ağırlıkça % 0.25, 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50 ve 3.00 oranlarında eklenmiş ve BF'nin kil içerisinde homojen şekilde dağılımını sağlamak için el ve mikser yardımıyla karıştırılmıştır. Daha sonra BF eklenmemiş ve eklenmiş örneklerde LL ve PL deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Kompresörle ayrılmış BF
Figure 3. BF separated by compressor

İnce daneli zeminlerin kıvamının değiştiği sınır değerleri Atterberg limitleri olup PL ve LL en önemli iki limit değeridir. PL ve LL yapılan deneyler ile belirlendikten sonra PI değerleri hesaplanmaktadır. Takviyesiz kaolinin LL ve PL değerlerinin belirlenmesi amacıyla LL ve PL deneyleri ASTM D4318-17e1 (2017) standardına uygun olarak yapılmıştır. Bu deneylere göre kaolin kilinin ortalama LL, PL ve PI değerlerinin sırasıyla % 45.00, % 24.00 ve % 21.00 olduğu belirlenmiştir. Kaolin kili, Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi (USCS)'ne göre sınıflandırılmış ve düşük plastisiteli (CL) kil olarak belirlenmiştir.

BF eklenmemiş kaolin kilinin LL, PL ve PI değerleri belirlendikten sonra, kuru ağırlıkça % 0.25, 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50 ve 3.00 oranlarında BF eklenerek toplam 35 adet karışım hazırlanmış ve bu örneklerde LL ve PL deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalara ait çalışma aşamalarını gösteren akış şeması Şekil 4'de görüldüğü gibidir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen LL ve PL değerleri kullanılarak örneklerin tamamına ait PI değerleri hesaplanmış ve tüm deneysel veriler Tablo 3'te sunulmuştur.



a: Takviyesiz kil, b: BF takviyeli kil, c: Kil ve BF'nin su ile karıştırılması, d: Likit limit deneyi için örneğin yerleştirilmesi, e: Oluk bıçağı ile oluğun açılması, f: Deney sonrasında oluğun kapanması, g: Plastik limit deneyinin yapılması

Şekil 4. LL ve PL deneylerine ait aşamalar

Figure 4. Stages of LL and PL experiments

Tablo 3. Takviyesiz ve takviyeli örneklerin LL, PL ve PI değerleri
Table 3. LL, PL and PI values of unreinforced and reinforced samples

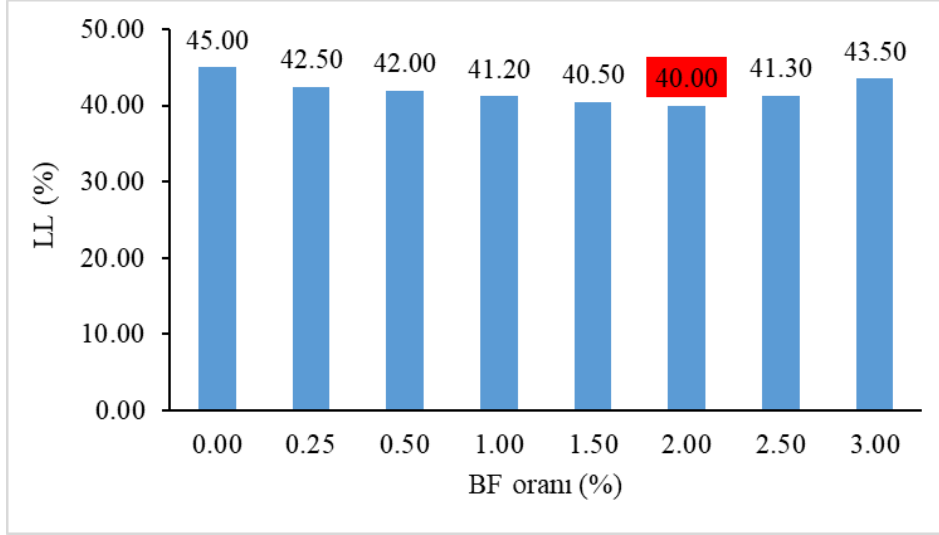
Örnekler	LL (%)			PL (%)			PI (%)
	Min.	Max.	Avrg.	Min.	Max.	Avrg.	Avrg.
K	44.10	46.50	45.00	23.10	26.15	24.00	21.00
K + % 0.25 BF	41.20	43.50	42.50	25.84	28.55	26.85	15.65
K + % 0.50 BF	41.50	44.00	42.00	26.22	29.55	27.00	15.00
K + % 1.00 BF	40.60	43.10	41.20	26.54	30.90	27.88	13.32
K + % 1.50 BF	39.00	43.40	40.50	26.96	30.87	28.36	12.14
K + % 2.00 BF	38.20	42.50	40.00	27.95	31.64	28.97	11.03
K + % 2.50 BF	40.10	43.00	41.30	26.95	30.15	27.88	13.42
K + % 3.00 BF	42.60	44.50	43.50	26.14	29.55	27.55	15.95

Tablo 3'te verilen deney sonuçlarına göre takviyesiz kil örneğinin ortalama LL, PL ve PI değerleri sırasıyla % 45.00, % 24.00 ve % 21.00'dir. BF takviyeli örneklerde ise ortalama LL değerleri % 40.00 - 43.50 aralığında değişim göstermektedir. En düşük LL değeri K + % 2.00 BF örneğinde % 40.00, maksimum LL değeri ise K + % 3.00 BF örneğinde % 43.50 olarak belirlenmiştir.

3. Bulgular

3. Results

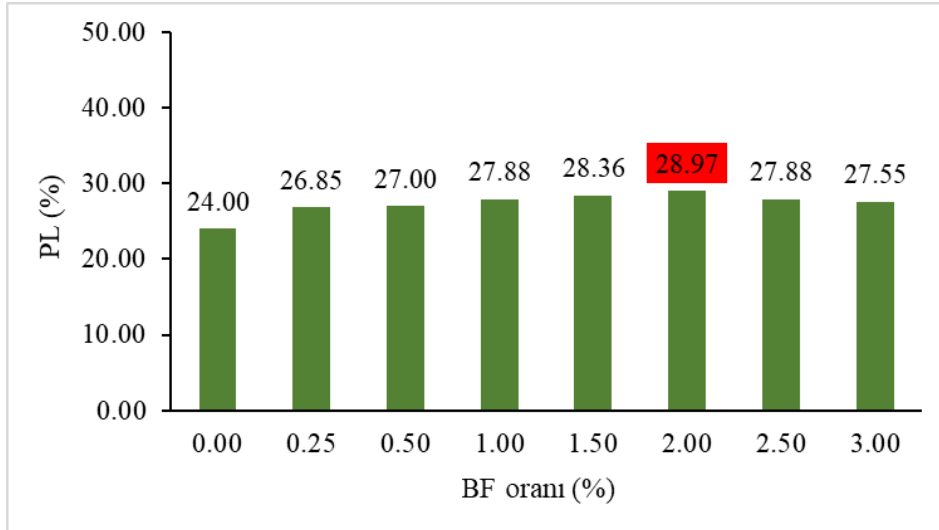
Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre; takviyeli örneklerin LL değerleri % 2.00 BF oranında en düşük değere düşmüş ve BF takviye oranının % 2.00'den daha fazla olduğu örneklerde ise artış göstermiştir. Ancak, BF takviyesiyle artış gösteren LL değerleri takviyesiz kilin LL değerine ulaşamamıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Örneklerin BF oranı - LL ilişkisi

Figure 5. BF ratio - LL relationship of samples

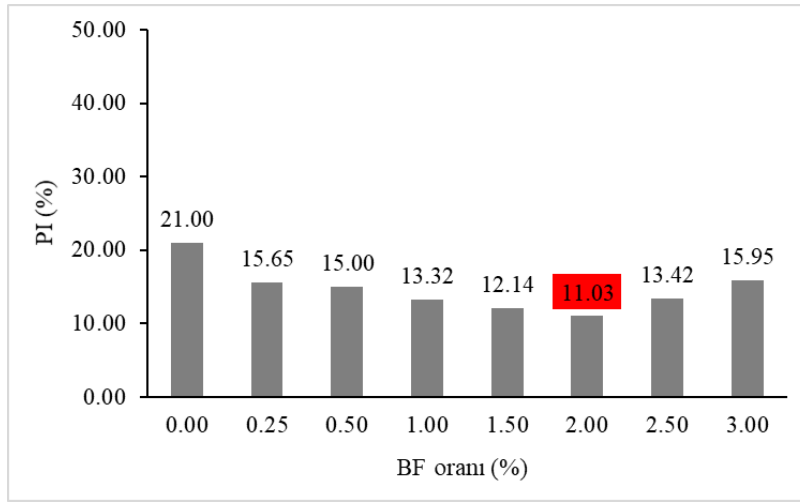
Takviyesiz kil örneğinin PL değeri ortalama % 24.00'dır. Takviyeli kil örneklerinde ise ortalama PL değerleri % 26.85 ile % 28.97 arasında değişim göstermektedir. BF oranının artmasıyla birlikte PL değerleri % 2.00 BF takviyeli örneğe kadar artmış, bu değerden sonra azalmaya başlamıştır. Minimum PL değeri ise % 0.25 BF takviyeli karışımda belirlenmiştir ve bu değer takviyesiz kilin PL değerinden büyüktür (Şekil 6).



Şekil 6. Örneklerin BF oranı - PL ilişkisi

Figure 6. BF ratio - PL relationship of samples

Yapılan LL ve PL deneylerinden sonra hesaplanan PI değerlerine göre takviyesiz kaolinin ortalama PI değeri % 21.00'dir. Takviyeli örneklerin ortalama PI değerleri ise % 11.03 - % 15.95 aralığında değişmektedir. PI değerinin en fazla azalma gösterdiği örnek K + % 2.00 BF'dir ve BF oranının % 2.00'den fazla olması durumunda PI değerleri artış göstermektedir. PI değerlerinde meydana gelen bu artışlara rağmen takviyeli kil örneklerinin PI değeri takviyesiz kilin PI değerinden oldukça düşüktür (Şekil 7).



Şekil 7. Örneklerin BF oranı - PI ilişkisi

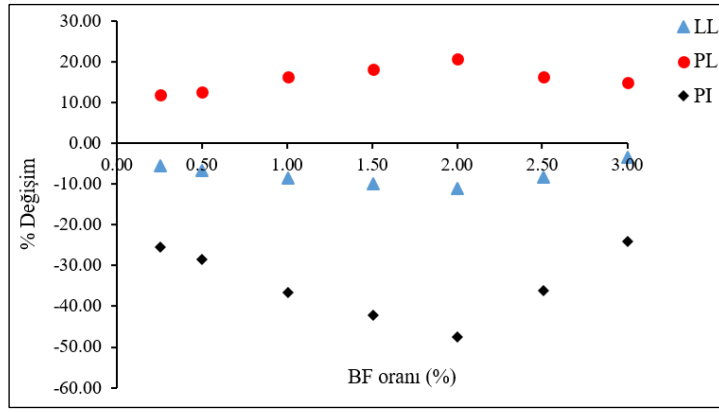
Figure 7. BF ratio - PI relationship of samples

Deney sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, artan BF oranıyla birlikte takviyesiz kile göre LL değerlerinin azaldığı, PL değerlerinin arttığı ve buna bağlı olarak da PI değerlerinin ise azaldığı belirlenmiştir. LL değerlerinde meydana gelen azalma % 2.00 BF oranından sonra yerini artmaya bırakmıştır. Ancak % 2.00'den daha fazla oranda BF kullanılmasıyla dahi takviyesiz kil örneğinin LL değerine ulaşan bir artış meydana gelmemiştir. Aravalli et al., (2017) ve Mukhtar and Kumar (2022) likit limit deneyi sırasındaki darbeler sonucunda bazalt fiberdeki statik kuvvetin sürtünme kuvvetine dönüştüğünü, bu şekilde zeminin kaymasına ve akmasına karşı direnç oluştuğunu, böylece zeminin LL değerlerinde azalmalara neden olduğunu belirtmişlerdir. Artan fiber oranıyla birlikte LL değerinde meydana gelen artışlar ise, bazı araştırmacılar (Baruah 2015; Sujatha et al., 2021; Al-Kaream et al., 2022) tarafından fiberin su emme özelliğinden dolayı meydana geldiği şeklinde açıklanmıştır. Literatürdeki bilgiler dikkate alınarak bu çalışma sonucunda ortaya çıkan LL değerinin belli bir BF oranına kadar azalması, fiberdeki statik kuvvetin sürtünme kuvvetine dönüşmesi ile zeminde akmaya karşı direnç oluşması ile ilişkilidir. Ancak % 2.00 BF oranından daha fazla oranda BF takviyesiyle LL değerinde meydana gelen artış, fiberin su emme özelliği ile ilişkilidir. Benzer değişim takviyeli örneklerin PI değerleri için de geçerlidir. BF takviyeli örneklerin PL değerleri ise % 2.00 BF oranına kadar artarken, BF oranındaki artış ile birlikte azalmaya başlamıştır. LL, PL ve PI değerlerinde meydana gelen değişim oranları ve grafiği Tablo 4 ve Şekil 8'de verilmiştir.

Tablo 4. Takviyeli örneklerin, takviyesiz kile göre kıvam limitlerinin % değişimleri

Table 4. % changes in consistency limits of reinforced samples compared to unreinforced clay

Örnekler	LL (%)	PL (%)	PI (%)
K	-	-	-
K + % 0.25 BF	-5.56	11.88	-25.48
K + % 0.50 BF	-6.67	12.50	-28.57
K + % 1.00 BF	-8.44	16.17	-36.57
K + % 1.50 BF	-10.00	18.17	-42.19
K + % 2.00 BF	-11.11	20.71	-47.48
K + % 2.50 BF	-8.22	16.17	-36.10
K + % 3.00 BF	-3.33	14.79	-24.05



Şekil 8. Takviyeli örneklerin LL, PL ve PI değerleri değişim grafiği
Figure 8. LL, PL and PI values change graph of reinforced samples

Takviyesiz kile, BF eklenmesiyle birlikte tüm karışımlarda LL değerlerinde meydana gelen bu azalma oranları %3.33 - % 11.11 arasındadır. LL değerindeki maksimum azalma % 11.11 ile K + % 2.00 BF örneğinde, minimum azalma ise % 3.33 ile K + % 3.00 BF örneğinde meydana gelmiştir. LL değerlerindeki azalma % 2.00 BF oranından sonra yerini artışa bırakmıştır. Örneklerin PL değerlerinde meydana gelen değişim oranları ise % 11.88 - % 20.71 aralığındadır. En büyük artış % 2.00 BF takviyeli örnekte, en küçük artış ise % 0.25 BF takviyeli örnekte gözlemlenmiştir. PL değerlerindeki artış % 2.00 BF oranına kadar devam etmiş, bu orandan sonra ise azalmalar oluşmuştur. LL ve PL değerlerindeki değişimlerden yola çıkarak PI değerlerinin de BF takviyeli tüm örneklerde azaldığını söylemek mümkündür. Takviyeli örneklerin, takviyesiz kile göre PI değerlerindeki azalma % 24.05 ile % 47.48 arasında değişim göstermektedir (Tablo 4, Şekil 8). Bu çalışmaya ait sonuçlar literatürde bu konuda yapılan çalışmalar ile karşılaştırıldığında, deneysel verilerin literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalarda zeminin PI meydana gelen azalma sonucunda zeminin dayanımının arttığı ve dayanım parametrelerinin iyileştiği (Aravalli et al., 2017; Mukhtar and Kumar, 2022) ve zeminin daha stabil hale geldiği (Chaudhary, 2021) ortaya konmuştur. Bu çalışmalar ışığında BF takviyesiyle kaolin kilinin PI meydana gelen azalmanın, zeminin dayanımını artırması açısından önemli olduğu düşünülmektedir.

4. Sonuçlar

4. Conclusions

BF takviyesinin kaolin kilinin LL, PL ve PI değerlerinde meydana getirdiği değişimler incelenmiştir. Düşük plastisiteli bir kil olan kaolin kiline BF eklenmesiyle birlikte, % 2.00 BF oranına kadar tüm karışımlarda LL değerleri azalmış, PL değeri ise artış göstermiştir. LL ve PL değerlerindeki değişimlere bağlı olarak PI değerleri de BF takviyeli tüm örneklerde azalmıştır. LL ve PI değerlerindeki azalmalar ile zeminin daha stabil hale geldiği ve akmaya karşı daha dirençli olduğunu söylemek mümkündür. Bu çalışmada kullanılan BF çevre dostu, doğal ve doğada bol miktarda bulunduğu için geleneksel zemin iyileştirme yöntemlerine oldukça iyi bir alternatif olma özelliği taşımaktadır ve kullanımının yaygınlaşması bu açıdan oldukça önemlidir.

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*

- Al-Kaream, K. W.A., Fattah, M. Y. ve Hameedi, M. K. (2022). Compressibility and strength development of soft soil by polypropylene fiber. *International Journal of GEOMATE*, 22(93), 91-97.
- Aslan Topçuoğlu, Y., & Gürocak, Z. (2023). Sodyum bentonit kilini güçlendirmede maksimum dayanım için optimum bazalt fiber oranının belirlenmesi. *Dicle University Journal of Engineering/Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 14(3). <https://doi.org/10.24012/dumf.1346476>
- Aslan Topçuoğlu, Y., & Gürocak, Z. (2024). The effect of basalt fiber reinforcement at different ratios on the unconfined compressive strength of kaolin. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1), 1-1. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1352665>
- ASTM D4318-17e1, (2017). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 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>
- Aravalli, A. B., Hulagabali, A. M., Solanki, C. H., & Dodagoudar, G. R. (2017). Enhancement of index and engineering properties of expansive soil using chopped basalt fibers. Indian Geotechnical Conference 2017 GeoNEs, 14-16 December 2017, IIT Guwahati, India, 1-4.
- Aishwarya, R., & Rachel, P. P. (2023). Comparative study on Atterberg limits of soil and basalt fiber composite as an eco-friendly construction material. *Materials Today: Proceedings*, 77, 563-567. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.212>
- 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>
- Baruah, H. (2015). Effect of glass fiber on red soil. *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, 3(1), 217-223. https://ijates.com/images/short_pdf/1447955068_211D.pdf
- 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. 10.9790/1684-1302030107
- Chaudhary, R. (2021). *Enhancing the properties of soil by stabilization technique using basalt fiber*, Civil Engineering Department, Delhi Technological University.
- 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>
- 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>
- Edincliler, 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>
- 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. DOI 10.1007/s10706-011-9427-8
- 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>

- Gürocak Z. ve Aslan Topçuoğlu Y. (2023). Bazalt fiber kullanımının düşük plastisiteli kilin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(3), 688-701. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1283148>
- 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>
- Kale, R. Y., Dahake, N. D., Sahu, S. M., Gawande, G. A., Wailker, P. J., Patekar, V. R., & Pawar, C. R. (2020). Soil Stabilization by using Basalt Fibers. *International Journal of Scientific Research & Engineering Trends*, 6(3), 1931-1935.
- Khudhair, A. H., Mahmood, R. A., & Jaber, M. A. (2022). Improving some geotechnical properties of cohesive soils by adding basalt fibers and portland cement in Basra Governorate-Southern Iraq. *Design Engineering*, 1, 1509-1522
- 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.
- MTA-Maden Tetkik Arama. (2024, Ocak, 5). <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/img/kaolen.pdf>
- Mukhtar, M., & Kumar, A. (2022). To Study the behavior of compacted soil using basalt fibers. *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management*, 9(2), 360-366.
- 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. DOI 10.1007/s12205-017-0960-8
- 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. DOI 10.1007/s10706-011-9445-6
- Roustaiei, 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>
- Sujatha, E. R., Atchaya, P., Darshan, S. & Subhashini, S. (2021). Mechanical properties of glass fibre reinforced soil and its application as subgrade reinforcement. *Road Materials and Pavement Design*, 22(10), 2384-2395. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1746387>
- 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.geotextmem.2006.11.002>
- 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>
- 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>