



Araştırma Makalesi / Research Article

Sodyum bentonit kilini güçlendirmede maksimum dayanım için optimum bazalt fiber oranının belirlenmesi

*Determination of the optimum basalt fiber ratio for maximum strength in sodium bentonite clay reinforcement*Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU*¹, Zülfü GÜROCAK²¹Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, yaslan@firat.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3135-5926>²Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, zgurocak@firat.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1049-8346>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 19 Ağustos 2023
Revizyon 1 Eylül 2023
Kabul 12 Eylül 2023
Online 30 Eylül 2023

Anahtar Kelimeler:

Bentonit, bazalt fiber, dayanım, güçlendirme

ÖZ

Düşük dayanımlı killeri stabilize etmek amacıyla sönmüş kireç, uçucu kül, silis dumanı, tüf, mermer tozu gibi katkı malzemelerinin kullanımı oldukça eski ve geleneksel bir uygulamadır. Ancak yeni teknolojik ürünlerin ortaya çıkışıyla birlikte bu geleneksel stabilizasyon yöntemleri yerini özellikle yapay fiber gibi ürünlerle yapılan güçlendirme yöntemlerine bırakmaya başlamıştır. Zemin iyileştirmede kullanılan, çevre dostu, doğal, doğada bol miktarda bulunan bu malzemelerden biri de bazalt fiberdir ve kullanımları gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Zemin güçlendirmede bazalt fiber kullanımının başarısı kullanılan bazalt fiberin boyutu ve oranı ile ilgilidir ve yapılan bilimsel çalışmalar bu konularda yoğunlaşmıştır. Bu çalışmanın amacı, bazalt fiber ile güçlendirilen yüksek plastisiteli bentonit kilinde bazalt fiber oranının dayanıma olan etkilerinin incelenmesidir. Bu amaçla bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. 6 mm uzunluğundaki bazalt fiberlerin kile farklı oranlarda eklenmesi ve optimum su içeriğinde sıkıştırılmasıyla hazırlanan silindirik örneklerde serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiş ve zeminin dayanımında meydana gelen değişimler belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçları, 6 mm uzunluğundaki bazalt fiber ile güçlendirilen bentonit kilinde maksimum dayanımın %4 bazalt fiber oranında elde edildiğini, bu orandan daha yüksek bazalt fiber oranlarında ise dayanımda azalmalar oluştuğunu göstermiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 19 August 2023
Received in revised form 1 September 2023
Accepted 12 September 2023
Available online 30 September 2023

Keywords:

Bentonite, basalt fiber, strength, reinforcement

ABSTRACT

The use of additives such as slaked lime, fly ash, silica fume, tuff, marble dust to stabilize low strength clays is a very old and traditional practice. However, with the emergence of new technological products, these traditional stabilization methods have begun to give way to reinforcement methods, especially with products such as artificial fiber. One of these eco-friendly, natural and abundant materials used in soil reinforcement is basalt fiber, and its use is becoming more common day by day. The success of using basalt fiber in soil reinforcement is related to the size and ratio of the basalt fiber used, and scientific studies have focused on these issues. The aim of this study is to examine the effects of basalt fiber ratio on strength in high plasticity bentonite clay reinforced with basalt fiber. For this purpose, a number of experimental studies have been carried out. Unconfined compressive tests were carried out on cylindrical samples prepared by adding 6 mm long basalt fibers to clay at different rates and compressing them at optimum water content, and the changes in the strength of the soil were determined. The results of the study showed that the maximum strength was obtained at the rate of 4% basalt fiber in bentonite clay reinforced with basalt fiber of 6 mm length, while there was a decrease in strength at basalt fiber ratios higher than this ratio.

Doi: 10.24012/dumf.1346476

* Sorumlu Yazar

Giriş

Yeni mühendislik malzemeleri, günümüzde hızlı gelişen teknoloji ve ihtiyaçlara bağlı olarak farklı kullanım alanları bulmaktadır. Üstün mühendislik özelliklerine ve yüksek performansa sahip bu yeni teknolojik ürünler klasik yöntemlere alternatif olarak ortaya çıkmıştır ve insanlar tarafından üretilebilen veya doğal olarak bulunabilen fiberler bu ürünlerden birisidir. Fiberler bir boyutu diğer boyutundan çok büyük olan, aynı malzemenin daha büyük şekline göre daha yüksek dayanım ve elastisite modülüne sahip malzemeler olarak tanımlanmaktadır [1]. Yapay ve doğal olmak üzere iki ana gruba ayrılan fiberlerden doğal fiberler, doğada hazır olarak bulunmakta iken yapay fiberler insanlar tarafından üretilmektedir. Polimer, cam ve bazalt gibi yapay fiberler, yüksek dayanımlı, hafif, esnek ve çevresel etkilere karşı dayanıklı olmalarından dolayı çok yaygın olarak kullanılmaktadır [2].

Artan çevresel problemler ve maliyetler daha ekonomik, çevre dostu, üstün özelliklere sahip ve hammadde ulaşılabilirliğin kolay olduğu yeni ürünlerin elde edilmesini gerekli hale getirmiştir. Geçmişte, yapı malzemeleri olan tuğla ve kerpicin dayanımlarını artırmak amacıyla doğadan alınan bitkisel ve hayvansal lifler kullanılırken, gelişen teknoloji ile farklı fiber türleri (sentetik polimer, karbon, cam) veya plastik atıklar doğal liflerin yerini almaya başlamıştır. Zemin güçlendirilmesinde bu fiberlerin kullanılması ve bunlara yönelik yapılan çalışmalarda son dönemde artış göstermiştir [3-23].

Bazalt kayasından elde edilen yeni teknoloji ürünlerinden birisi de bazalt fiber (BF)'dir. Önemli bir doğal yapı malzemesi olan ve geçmişten günümüze kadar inşaat sektöründe kullanılan bazalt, volkanizma sonucu püsküren lavların soğuması ile oluşan bir kaya türüdür ve BF'nin de hammaddesidir. BF'yi önemli kılan özellikler arasında, kolay erişilebilir, ucuz, çok fazla olması, çekme dayanımının, kimyasal direncinin, sıcaklığa karşı dayanımının, mantar ve mikroorganizma direncinin yüksek olması sıralanabilir. Killi zeminlerin BF ile güçlendirilmesi konusundan son 10 yıl içerisinde önemli bilimsel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda güçlendirmede kullanılan BF'nin oranı ve boyutunun güçlendirmedeki önemi incelenmiştir.

Ndepete ve Sert [24] 24 mm boyundaki ve %1.5 oranındaki BF ile takviye ettikleri siltli zeminde dayanımın maksimum olduğunu, Özdemir vd. [25], kaolin kilinde %1 BF takviyesi ve %9 kireç katkısı kullanarak hazırladıkları karışımda 28 günlük kür uygulamasıyla dayanımın 5.5 kat arttığını belirtmişlerdir.

Wang vd. [26], %6 oranında kireç ve sodyum-silikat ve %0.4 oranında 12 mm uzunluğundaki BF ile takviye ettikleri zeminde maksimum dayanım elde ettiklerini, Gisymol ve Ramya [27] ise 10 mm boyunda BF'nin organik zeminde %0.05 oranında kullanılması ve 28 gün kür uygulanmasıyla dayanımda maksimum artışın meydana geldiğini ifade etmiştir.

Qu vd. [28] killi zeminin kayma dayanımına BF takviyesi ve nano-silika katkısının etkisini incelemiş ve %0.5 BF takviyesi ile %1 nano silika katkısının kilin kayma dayanımında maksimum artışa neden olduğunu belirlemişlerdir. Boz vd. [29], yüksek plastisiteli kaolin kilinde maksimum dayanım artışının 90 günlük kür, %9 oranında kireç ve %0.75 oranında 19 mm boyunda BF'nin

kullanılmasıyla meydana geldiğini, Kenan ve Özocak [30] ise konsolide edilmiş siltli zeminde, 24 mm uzunluğundaki optimum BF oranının %1.5 olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Ma vd. [31], düşük plastisiteli şişen bir kilde yaptıkları araştırma sonucunda, en yüksek dayanım artışını %10 uçucu kül ve %8 kum katkılı, %0.4 BF takviyeli örnekte belirlemişlerdir. Pandit vd. [32], yüksek plastisiteli killi zeminde %4 oranında 12 mm boyundaki BF takviyesinin maksimum kuru birim hacim ağırlıkta artışa, optimum su içeriğinde ise azalmaya neden olduğunu belirlemişlerdir.

Küçükosmanoğlu [33], düşük plastisiteli killi bir zeminde yaptığı çalışmada 6, 12, 24 mm uzunlukta ve ağırlıkça %2.0, 1.5, 1.0, 0.20, 0.15, 0.10, 0.05 oranlarında BF'yi kil bir zeminde takviye olarak kullanmış ve 6 mm uzunluğa sahip BF'nin %0.20 oranında kullanılmasıyla en az şişme ve maksimum taşıma gücü oranının (CBR) meydana geldiğini belirlemiştir. Ocakbaşı [34] ise yüksek plastisiteli kilde maksimum dayanım değerlerinin boyu 24 mm olan BF'nin %2 oranında kullanılmasıyla hazırlanan karışımlarda belirlendiğini ifade etmiştir.

Türkel [35] kumlu zemine ağırlıkça %2.5, 5, 10 oranlarında çimento katkısı ve %1, 2, 3, 4 oranlarında BF takviyesi ile hazırladığı örneklerde yaptığı deneysel çalışma sonuçlarına göre %10 çimento katkısı ve %1 BF takviyesinin taşıma gücü oranında, %10 çimento ve %3 BF takviyesinin kayma direncinde ve %10 çimento ve %4 BF takviyesinin ise serbest basınç dayanımında maksimum artışa neden olduğunu belirlemiştir.

Sungur vd. [36], ise BF takviyeli düşük plastisiteli killi zeminde 15 mm boyundaki BF'nin %1.5 oranında eklendiği örneklerde en yüksek kayma dayanımının meydana geldiğini belirtmiştir.

Terzi [37], yüksek plastisiteli kile ağırlıkça %0, 1, 1.5, 2 ve 2.5 oranında 6 mm, 12 mm ve 24 mm uzunluğunda BF ekleyip konsolide ettikten sonra yaptığı deneyler sonucunda, maksimum kohezyon değerinin 12 mm boyundaki %1.5 oranında BF takviyeli örnekte, maksimum içsel sürtünme açısının ise 24 mm boyundaki %2 oranında BF takviyeli örnekte belirlendiğini ifade etmiştir.

Xu vd. [38], BF ile güçlendirilmiş düşük plastisiteli lölserde üç farklı fiber uzunluğunda ve dört farklı fiber içeriğinde hazırladıkları takviyeli örneklerde maksimum fiber oranının %0.6, fiber uzunluğunun ise 12 mm olması halinde lölün kayma dayanımının önemli ölçüde iyileştiğini belirtmiştir.

Zhao vd. [39], BF ve polipropilen fiberin düşük plastisiteli kil üzerindeki güçlendirici etkisini inceledikleri çalışmada, fiberlerin dayanıma olan etkisinin esas olarak kohezyon üzerindeki iyileştirici etkisinden geldiğini, ancak fiberin içsel sürtünme açısının artmasına çok fazla katkı sağlamadığını, fiberlerin 10-13 mm uzunluğunda ve %0.2 oranında olduğunda dayanıma olan etkilerinin maksimuma çıkabileceğini ileri sürmüştür.

Saran ve Demiröz [40], yüksek plastisiteli kile BF ve uçucu kül ekleyerek hazırladıkları örneklerde serbest basınç ve yarmada çekme deneyleri yapmışlardır. Araştırmacılar dayanımdaki maksimum artışı 18 mm uzunluğundaki %1 BF takviyesi ve %10 uçucu kül katkısı ile ve 56 günlük kür sonrasında elde etmişlerdir.

Gürocak ve Aslan Topçuoğlu [41], düşük plastisiteli kaolin kiline farklı oranlarda (%0, 1, 2, 3) boyu 24 mm olan BF ve

farklı oranlarda (%20, 25, 30 ve 35) su ekleyerek hazırladıkları karışımlarda yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda, maksimum serbest basınç dayanımının %1 BF oranında ve %25 su içeriğinde elde edildiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada literatürdeki çalışmalarda kullanılan zemin türlerinden farklı olarak sodyum bentonit kili tercih edilmiştir. Oldukça yüksek bir plastisiteye sahip olan (LL = %507, PI = %466) bu kil türü özellikle seçilmiştir. Böylece, hem şu ana kadar yapılmış olan çalışmalardan farklı bir kil türü kullanılmış olacak, hem de oldukça yüksek plastisiteye sahip killi zeminlerde BF takviyesinin etkisinin nasıl olacağı hakkında bilgi edinme imkanı sunacaktır. Çünkü literatürdeki çalışmalarda kullanılan zemin türleri arasında bu kadar yüksek plastisiteye sahip bir kil kullanılmamıştır. Ancak, bu çalışmadan elde edilecek çıktılar doğrudan uygulamaya dönük olmaktan ziyade, çok yüksek plastisiteye sahip killi zeminlerin güçlendirilmesi ile ilgili literatüre katkı sunacaktır.

2. Materyal ve metot

2.1. Materyal

Bu çalışmada kil olarak yüksek plastisiteli sodyum bentonit kili, takviye malzemesi olarak ise son yıllarda yaygın olarak tercih edilen araştırılması ve geliştirilmesine hala ihtiyaç duyulan BF kullanılmıştır.

2.1.1. Bentonit kili

Bentonit kili montmorillonit ailesine bağlı bir kil minerali olup magnezyum ve alüminyumca zengin tuf, lav ve volkanik küllerin kimyasal olarak ayrışması veya bozulması ile oluşmaktadır [42, 43]. Kimyasal olarak hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan oluşmuştur. Bentonit tane boyu 2 µm ya da daha küçük, yoğunluğu ~ 2.6 gr/cm³, iyonlaşma kapasitesi fazla, plastisitesi yüksek ve su ile temas ettiklerinde şişme özelliği gösterip hacmi artan bir kildir [44]. Bu çalışmada kullanılan bentonit kili (Şekil 1) Tokat-Reşadiye (Türkiye) kil ocağından temin edilmiş olup, Aslan Topçuoğlu [45] yapmış olduğu çalışmada bu kilin Na-bentonit olduğunu tespit etmiştir. Bentonit kilinin kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan bentonit kili.

Tablo 1. Bentonit kilinin kimyasal bileşimi [45].

Ana Oksit (%)	Bentonit Kili
SiO ₂	62.50
Al ₂ O ₃	17.60
Fe ₂ O ₃	3.63
CaO	2.86
Na ₂ O	2.58
K ₂ O	0.92
TiO ₂	0.32
SO ₃	0.076
Cr ₂ O ₃	<0.01
Kızdırma Kaybı	6.60

2.1.2. Bazalt fiber (BF)

Fransız Paul Dhé 1923 yılında bazalttan fiber üretme fikrini ortaya atmıştır [46]. 1985’te Kiev’de ilk bazalt fabrikası faaliyete geçmiştir [47]. BF 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 kökenli bir kayadır ve termo-plastik malzemeler gibi ısıtıldığında ergimektedir. Kimyasal olarak incelendiğinde bazaltı oluşturan ana bileşen SiO₂’dir ve ikinci ana bileşen ise Al₂O₃’tür. Bu iki ana bileşeni Fe₂O₃, FeO, CaO ve MgO takip etmektedir [47]. Bu çalışmada kullanılan BF 6 mm boyunda olup BF satışı yapan firmadan temin edilmiştir (Şekil 2). BF’nin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan ayrıştırılmamış BF.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan BF’nin mekanik ve fiziksel özellikleri.

Özellik	Değer
Fiber boyu (mm)	6
Monofilament Çapı (µm)	15 ±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. Deneysel çalışmalar

Bu çalışmada örnek hazırlama, takviyesiz bentonit kilinin kıvam limiti deneyleri, takviyesiz ve BF takviyeli örneklerin standart proktor ve serbest basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar Fırat Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kaya-Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

2.2.1. Örnek hazırlama

İlk olarak bentonit kili 105 °C'de etüvde 24 saat kurutulmuştur. BF'ye ise kompresörle ayrıştırma işlemi uygulanmıştır (Şekil 3). Önceden belirlenmiş miktardaki kil ve ayrıştırılmış BF mikser ile karıştırılmıştır (Şekil 4). Bu tür çalışmalarda çoğunlukla zemin etüvde kurutulduktan sonra fiber eklenmekte ve daha sonra bu karışıma belirlenen miktarda su ilave edilmektedir [48-52]. BF takviyeli karışımlara daha önceden belirlenmiş olan optimum su içeriği değerinde distile su eşit olacak şekilde püskürtüldükten sonra mikser yardımıyla tekrar karıştırılmıştır. Ayrıca zaman zaman el ile de karıştırma yapılarak zemin içerisinde fiberlerin homojen bir şekilde dağılması sağlanarak, fiber toplanması ve yığılması engellenmeye çalışılmıştır. Karıştırma süresi, homojen bir karışım sağlamak amacıyla 10 dakika olarak seçilmiştir.



Şekil 3. Kompresörle ayrıştırılmış BF.

Çalışmada kullanılan karışımlara ait BF boyu ve oranları Tablo 3'de verilmiştir



Şekil 4. Kil ve BF karışımlarının hazırlanması.

Tablo 3. Deneysel çalışmalarda kullanılan BF boyu ve oranları.

BF Boyu (mm)	BF Oranı (%)	Örnek Adı
6	0	B
	1	B+%1BF
	2	B+%2BF
	3	B+%3BF
	4	B+%4BF
	5	B+%5BF

B: Bentonit BF: Bazalt Fiber

2.2.2. Kıvam limitleri deneyi

Kıvam limitleri, likit limit (LL) ve plastik limit (PL) olup ince taneli zeminlerde su içeriğine bağlı olarak kıvamın değişim gösterdiği sınırlar olarak ifade edilmektedir. LL, zeminin viskoz kıvamdan plastik kıvama geçtiği andaki su içeriği, PL ise zeminin yarı katı kıvamdan plastik kıvama geçtiği andaki su içeriğidir. Takviyesiz bentonit kilinin LL, PL ve plastisite indisi (PI) değerleri ASTM D4318-17e1 [53] göre belirlenmiş ve deneyler 10 adet örnekte yapılmıştır.

Kıvam limitleri deney sonuçlarına göre takviyesiz bentonit kilinin LL değeri %507, PL değeri %41 ve PI değeri %466 olarak belirlenmiş ve kilin sınıfı Birleştirilmiş Zemin Sınıflamasına (USCS) göre yüksek plastisiteli kil (CH)'dir (Tablo 4).

Tablo 4. Bentonit kiline ait kıvam limitleri ve proktor deney sonuçları.

Parametre	Değerler
LL (%)	507
PL (%)	41
PI (%)	466
w _{opt} (%)	38.50
γ _{kmax} (kN/m ³)	12.36
Zemin Sınıfı(USCS)	CH

2.2.3. Standart proktor deneyi

Bentonit kilinde ASTM D698- 12e2 [54] standardına göre yapılan proktor deneyleriyle maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) ve optimum su içeriği (w_{opt}) değerleri belirlenmiştir (Şekil 5). Deney, 2.5 kg'lık yükün zemin üzerine 30.5 cm yükseklikten serbest düşmeye bırakılması ve kalıp içerisinde zeminin üç tabaka şeklinde sıkıştırılmasıyla gerçekleştirilmektedir.

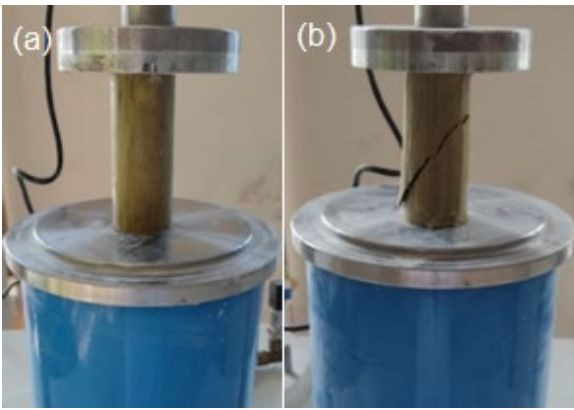


Şekil 5. Standart proktor deneyinin yapılışı (a) deney sonucu sıkıştırılmış örnek (b).

Yapılan standart proktor deneyi sonuçlarına göre bentonit kilinin w_{opt} değeri %38.50, γ_{kmax} değeri 12.36 kN/m³, olarak belirlenmiş ve deneylere ait sonuçlar Tablo 3’de verilmiştir.

2.2.4. Serbest basınç deneyi

Zeminin serbest basınç dayanımını (q_u) belirlemek amacıyla serbest basınç deneyleri yapılmaktadır. Bu deneyde; silindirik zemin örneği üzerine sadece aksel yönde yükleme yapılmakta ve en büyük aksel gerilmenin değeri zeminin q_u değerini temsil etmektedir. Serbest basınç deneyleri 6 mm boyundaki BF’nin kuru ağırlıkça %1, 2, 3, 4 ve 5 oranlarında bentonit kiline eklenmesiyle oluşturulan karışımların takviyesiz bentonitin optimum su içeriğinde proktor deneyi ile sıkıştırıldıktan sonra alınan 30 adet silindirik örnekte, ASTM D2166M-16 [55] standardına göre gerçekleştirilmiş ve q_u değerleri belirlenmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. BF takviyeli bentonit kilinin serbest basınç deneyi öncesi (a) ve deney sonrası (b) örnekler.

Serbest basınç deneyleri sonuçlarına göre takviyesiz bentonit kilinin ortalama q_u değeri 206.93 kPa olarak belirlenmiştir. BF takviyeli bentonit örneklerinin ortalama q_u değerleri ise 200.03 - 237.48 kPa arasında değişmektedir (Tablo 5).

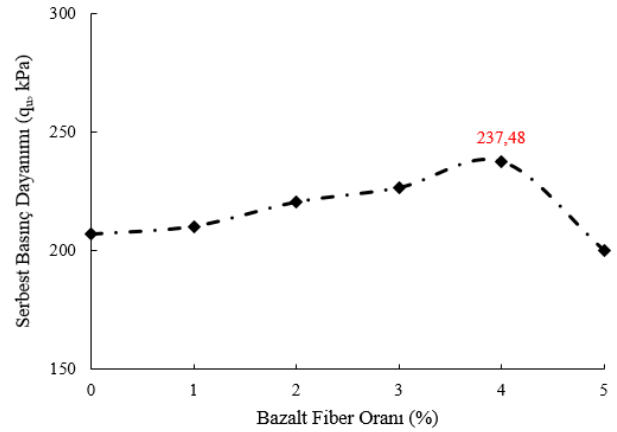
Tablo 5. Takviyesiz ve BF takviyeli bentonit kilinin serbest basınç deney sonuçları.

Fiber Boyu (mm)	Örnek Adı	q_u (kPa)
6	B	206.93
	B+%1BF	210.24
	B+%2BF	220.44
	B+%3BF	226.50
	B+%4BF	237.48
	B+%5BF	200.03

3. Bulgular ve tartışma

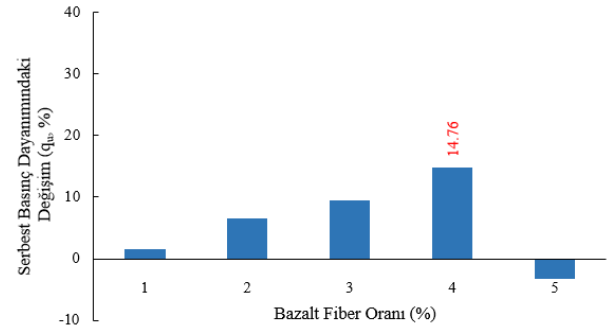
DeneySEL çalışmalar ile, takviyesiz ve BF takviyeli karışımların serbest basınç dayanımlarında meydana gelen değişimleri ortaya konmaya ve dayanımda maksimum iyileşmeyi sağlayan optimum BF oranı belirlenmeye çalışılmıştır. Takviyesiz bentonit kilinin q_u değeri 206.93 kPa’dır ve farklı oranlarda BF takviyesi ile q_u değerlerinin 200.03 - 237.48 kPa arasında değiştiği belirlenmiştir. En düşük q_u değeri %5 BF takviyeli örnekte 200.03 kPa, en büyük q_u değeri ise %4 BF takviyeli örnekte 237.48 kPa olarak bulunmuştur (Tablo 4). BF oranının %4 olduğu

örnekte dayanım maksimum değere ulaşmış, BF takviyesinin %4’u aştığı örneklerde ise dayanım değeri azalma göstermiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Bentonit kiline ait q_u - BF oranı ilişkisi.

Takviyesiz bentonite göre dayanım değerlerinde %1 BF takviyeli örnekte %1.60, %2 BF takviyeli örnekte %6.53, %3 BF takviyeli örnekte %9.46, %4 BF takviyeli örnekte %14.76 oranında bir artış meydana gelirken %5 BF takviyeli örnekte %3.33’lük bir azalma meydana gelmiştir (Şekil 8). Tüm bu verilere göre takviyesiz bentonit kilinin optimum su içeriğinde sıkıştırılmış, 6 mm uzunluktaki BF ile takviye edilmiş bentonit için optimum BF oranının %4 olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 8. Bentonit kiline ait % q_u değişimi - BF oranı ilişkisi.

Bentonit kiline eklenen 6 mm boyundaki BF’nin, kilin dayanımını belli bir orana kadar artırdığı, %4 BF oranından sonra ise dayanımı azalttığı görülmüştür. Bunun nedeni ise artan fiber oranının zemin içerisinde oluşturduğu fiber yığılması-toplanması ve fiberin zemin içerisinde homojen dağıtılmasında karşılaşılan zorluk olarak açıklanabilir [33, 36, 37, 48]. Zemin içindeki fiber oranının fazla olduğu durumda fiberler arasında elektrostatik etkileşim meydana gelmekte ve fiberler zemin içinde homojen olarak dağılmadığı için kümeler halinde toplanmaktadır. Bundan dolayı da dayanım azalmaktadır [48].

Literatürde BF ile ilgili çalışmalardan bir kısmında [24, 27, 30, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 41] farklı zemin türleri farklı boyut ve oranda BF ile güçlendirilmiştir. Bu çalışmalara ait sonuçlar incelendiğinde, zemin türü, zeminin plastisitesi, su içeriği ve BF uzunluğunun optimum BF oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Siltli kilin kullanıldığı çalışmalarda [24, 30] belirlenen optimum BF oranı %1.5’tur. Düşük plastisiteye sahip lölserin BF ile güçlendirildiği çalışmada [38] ise BF uzunluğu 12 mm’dır

ve optimum BF oranı %0.6 olarak belirlenmiştir. Düşük plastisiteli killerde yapılan çalışmalarda [33, 36, 39, 41] ise BF boyutuna bağlı olarak optimum BF oranı %0.2 ile 2 arasında değişmektedir. Organik zeminde yapılan çalışmada ise [27] bu oran %0.05 olarak verilmektedir. Bu BF oranları, bu çalışmada belirlenen %4'lük orandan oldukça düşüktür. Plastisitesi yüksek olan killi zeminlerde yapılan çalışmalarda [32, 34, 37] ise yine BF boyutuna bağlı olarak verilen optimum BF oranları %2 ile 4 arasındadır ve optimum BF oranları, yüksek plastisiteli sodyum bentonitin kullanıldığı bu çalışmada elde edilen %4 BF oranı ile uyumludur. Bu sonuçlar, BF ile zeminlerde yapılacak güçlendirmelerde, BF boyutu ile birlikte zeminin plastisitesinin de optimum BF oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

BF ile zemin güçlendirilmesi konusunda yapılan diğer bir grup çalışmada [25, 26, 28, 29, 31, 40] ise, sadece BF değil aynı zamanda kireç, sodyum-silikat, nano-silika, uçucu kül ve çimento gibi puzolanik özelliğe sahip katkı malzemeleri de kullanılmış ve ayrıca küreme de yapılmıştır. Bu çalışmalardan bir kısmında [25, 26, 28, 29, 31] düşük plastisiteye sahip killer kullanılmıştır. BF uzunluğu ve su içeriğine bağlı olarak belirlenen optimum BF oranları %0.4-1 arasındadır ve bu çalışmada belirlenen optimum BF oranından oldukça düşük değerlerdir. Zeminlerin düşük plastisiteli olması ile birlikte kimyasal olarak stabilize edilmeleri ve kür uygulanması sonucunda optimum BF oranı oldukça düşük oranlara inmiştir. Daha yüksek optimum BF oranının beklendiği yüksek plastisiteli kilin kullanıldığı çalışmada [40] ise uçucu kül ile stabilizasyon ve küreme yapıldığı için optimum BF oranı %1 olarak belirlenmiştir. Çünkü, yüksek plastisiteli killerde kimyasal stabilizasyon ve kür sonrasında kilin plastisitesi önemli bir oranda azalmakta ve bu azalmaya bağlı olarak da optimum BF oranı da azalmaktadır.

Kumlu zeminde çimento ve BF ile yapılan çalışmada [35] ise ince taneli zeminlerin kullanıldığı diğer çalışmalardan farklı olarak, BF'nin dayanıma olan etkisinin çok az olduğu, çimento ile yapılan stabilizasyon ve BF takviyesinin birlikte kullanılması ve 28 günlük kür sonunda dayanımda dikkate değer artışların elde edildiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar iri taneli zeminlerde BF takviyesinin tek başına başarılı bir güçlendirme yapılamayacağını, ancak BF ile birlikte zeminin puzolanik bir malzeme ile stabilize edilmesi ve kür uygulanması sonucunda BF takviyesinin etkili olabileceğini göstermektedir.

Literatürde BF takviyesi ile ilgili çalışmalara ait bu sonuçlar, bu çalışmada neden %4 gibi yüksek bir optimum BF oranının elde edildiğini daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Çünkü bu çalışmada oldukça yüksek bir plastisiteye sahip bentonit kullanılmıştır ve BF takviyesinden başka herhangi bir puzolanik katkı malzemesi eklenmemiş ve küreme de yapılmamıştır. Literatürdeki çalışmalar ile ortaya konan zeminin plastisitesi ile optimum BF oranı arasındaki ilişki dikkate

alındığında, bu çalışmada kullanılan bentonit yüksek plastisiteye sahip olduğundan ve herhangi bir kimyasal stabilizasyon ve küremeye tabi tutulmadığından optimum BF oranı olarak önceki çalışmalara göre %4 gibi yüksek bir değer elde edilmiştir.

Sonuçlar

Yüksek plastisiteli killi zeminlerin güçlendirilmesinde optimum BF oranının belirlenmesi amacıyla yapılan bu deneysel çalışmalara ait sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

1. Serbest basınç deneyleriyle takviyesiz bentonit kilinin dayanım değeri 206.93 kPa olarak belirlenmiştir. Farklı oranda BF takviyeli bentonit örneklerinin dayanım değerlerinin 200.03 - 237.48 kPa arasında değiştiği tespit edilmiştir.
2. Bentonit kilinde %4 oranında BF takviyesinin kullanıldığı örnekte q_u değeri takviyesiz bentonite göre %14.76 oranında artış göstermiştir. Araştırma sonuçlarına göre, takviyesiz bentonitin optimum su içeriğinde sıkıştırılmış BF takviyeli bentonit için serbest basınç dayanımda en fazla artışı sağlayan BF oranının %4 olduğunu söylemek mümkündür.
3. Killere eklenen BF oranı arttıkça belli bir değere kadar dayanım değerleri artmakta BF'nin daha fazla artmasına bağlı olarak ise azalmaktadır. Nitekim %5 oranında BF takviyesi ile q_u değerleri %3.33 oranında azalmaktadır.
4. Bu çalışmadan elde edilen verilerin literatürde bu konuda yapılan çalışmalara ait sonuçlar ile karşılaştırılması sonucunda, BF ile yapılacak zemin güçlendirmelerde BF boyutu ve su içeriği ile birlikte, zeminin plastisitesinin de önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Güçlendirilen zeminin düşük plastisiteli olması durumunda optimum BF oranı %0.2-2 arasında iken, bu oran yüksek plastisiteli killi zeminlerde yapılan güçlendirme ile ilgili çalışmalarda %0.4-1 arasındadır. Zeminin plastisitesi azaldıkça optimum BF oranı da azalmaktadır.
5. Bu çalışmayla ortaya konan veriler doğal, çevre dostu ve doğada bol miktarda bulunan klasik zemin iyileştirme yöntemlerine alternatif olarak son yıllarda çok fazla ilgi çeken BF'nin daha iyi anlaşılması, araştırılması ve literatüre bu anlamda katkı sağlaması açısından önem taşımakla birlikte, BF kullanılacak uygulamalarda, başarılı bir güçlendirme için BF boyutu, su içeriği, zeminin türü ve plastisitesinin optimum BF oranı üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahip olduğu unutulmamalıdır.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

“Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır”

Yazar Katkıları

Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU, Çalışma konsepti ve tasarım, Veri toplama, Taslağın oluşturulması, Verilerin analizi ve yorumlanması

Zülfü GÜROCAK, Çalışma konsepti ve tasarım, Veri toplama, Taslağın oluşturulması, Verilerin analizi ve yorumlanması

Kaynaklar

- [1] Ö. Ekincioglu, "Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı: Bir optimum tasarım", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2003.
- [2] M. Aral, "Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı-bir optimum tasarım", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2006.
- [3] C. Tang, B. Shi, W. Gao, F. Chen, Y. Cai, "Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil", *Geotextiles and Geomembranes*, 25(3), 194-202, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2006.11.002>
- [4] M.R. Abdi, A., Parsapajouh, M.A. Arjomand, "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, 2008.
- [5] F. Ahmad, F. Bateni, M. Azmi, "Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres", *Geotextiles & Geomembranes*, 28(1), 93-99, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2009.09.017>
- [6] A. Diambra, E. Ibrahim, D.M. Wood, A.R. Russell, "Fibre reinforced sands: experiments and modeling", *Geotextiles & Geomembranes*, 28(3), 238-250, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2009.09.010>
- [7] A.S. Zaimoglu, "Freezing-thawing behavior of fine-grained soils reinforced with polypropylene fibers" *Cold Regions Science and Technology*, 60(1), 63-65, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.07.001>
- [8] A.R. Estabragh, A.T. Bordbar, A.A. Javadi, "Mechanical behavior of a clay soil reinforced with nylon fibers", *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(5), 899-908, 2011, <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9427-8>
- [9] S. Kinjal, A. K. Desai, C.H. Solanki, "Experimental study on the Atterberg limits of expansive soil reinforced with polyester triangular fibers", *International Journal of Engineering Research*, 2012.
- [10] P.K. Pradhan, R.K. Kar, A. Naik, "Effect of random inclusion of polypropylene fibers on strength characteristics of cohesive soil", *Geotechnical and Geological Engineering*, 30, 15-25, 2012, <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9445-6>
- [11] T. Eskişar, E. Karakan, S. Altun, "Effects of fibre reinforcement on liquefaction behaviour of poorly graded sands", *Procedia Engineering*, 161, 538-542, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.688>
- [12] A. Edincliler, A. Cagatay, "Weak subgrade improvement with rubber fibre inclusions", *Geosynthetics International*, 20(1), 39-46, 2013, <https://doi.org/10.1680/gein.12.00038>
- [13] E. Botero, A. Ossa, G. Sherwell, E. Ovando-Shelley, "Stress-strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET)", *Geotextiles and Geomembranes*, 43(4), 363-369, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2015.04.003>
- [14] M. Roustaei, A. Eslami, M. Ghazavi, "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, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.09.011>
- [15] B.A. Behbahani, H. Sedaghatnezhad, F. Changizi, "Engineering properties of soils reinforced by recycled polyester fiber", *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 13(2), 01-07, 2016.
- [16] M.E. Orakoglu, J. Liu, "Effect of freeze-thaw cycles on triaxial strength properties of fiber-reinforced clayey soil", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(6), 2128-2140, 2017, <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0960-8>
- [17] P.F. Amini, R. Noorzad, "Energy-based evaluation of liquefaction of fiber-reinforced sand using cyclic triaxial testing", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104, 45-53, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.09.026>
- [18] H. Cui, Z. Jin, X. Bao, W. Tang, B. Dong, "Effect of carbon fiber and nanosilica on shear properties of silty soil and the mechanisms", *Construction and Building Materials*, 189, 286-295, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.181>
- [19] M.A.M. Al-Bared, I.S.H. Harahap, A. Marto, S.V.A.N.K. Abad, M.O.A. Ali, "Undrained shear strength and microstructural characterization of treated soft soil with recycled materials", *Geomechanics and Engineering*, 18(4), 427-437, 2019, <https://doi.org/10.12989/gae.2019.18.4.427>
- [20] S. Lee, J. Im, G.C. Cho, I. Chang, "Laboratory triaxial test behavior of xanthan gum biopolymer treated sands", *Geomechanics and Engineering*, 17(5), 445-452, 2019, <https://doi.org/10.12989/gae.2019.17.5.445>
- [21] B. Fındıkçı, "Bentonit kilinin cam fiber ile iyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, 2020.
- [22] M. Valipour, P.T. Shourijeh, A. Mohammadina, "Application of recycled tire polymer fibers and glass fibers for clay reinforcement", *Transportation Geotechnics*, 27, 1-14, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100474>

- [23] Y. Wang, P. Guo, S. Shan, H. Yuan, Bi Yuan, "Study on strength influence mechanism of fiber-reinforced expansive soil using jute", *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(4), 1079-1088, 2016.
- [24] C.P. Ndepete S. Sert, "Use of basalt fibers for soil improvement", *Acta Physica Polonica*, 130(1), 355-356, 2016.
- [25] T. Özdemir, G.E. Polat, O. Azdeniz, A. Boz, A. Sezer, "Bazalt fiber ve kireç ile güçlendirilmiş kil zeminin dayanım özellikleri", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi*, 1025-1034, 2016.
- [26] S. Wang, Q. Xue, W. Ma, K. Zhao, Z. Wu, "Experimental study on mechanical properties of fiber-reinforced and geopolymer-stabilized clay soil", *Construction and Building Materials* 272(2021), 121914, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121914>.
- [27] P.G. Gisymol, K. Ramya, "A study on the effect of basalt fiber in organic soil", *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 14(4), 13-17, 2017.
- [28] J. Qu, C. Hu, C. Zhao, "Shear strength experimental study on basalt fiber and nano-silica reinforced Shanghai clay", *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 28(3), 186-192, 2017,
- [29] A. Boz, A. Sezer, T. Özdemir, G.E. Hızal, O. Azdeniz Dolmacı, "Mechanical properties of lime-treated clay reinforced with different types of randomly distributed fibers", *Arabian Journal of Geosciences*, 11(122), 1-14, 2018, <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3458-x>
- [30] A. Kenan, A. Özocak, "Bazalt fiber katkısının siltli zeminlerin kayma direncine etkisi", *2nd International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management*, 2018.
- [31] Q.Y. Ma, Z.M. Cao, P. Yuan, "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, 2018, <https://doi.org/10.1155/2018/9125127>
- [32] V.M. Pandit, C. Rohit, K. Tushar, C. Ayushi, G. Bhushan, C. Deepali, "Study of basalt fiber on compaction characteristics of black cotton soil", *6th International Conference on Recent Trends in Engineering & Technology (ICRTET)*, 850-853, 2018.
- [33] M. Küçükosmanoğlu, "Bazalt fiberin zemin iyileştirilmesinde kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2019.
- [34] P. Ocakbaşı, "Bazalt fiber katkısının killi zeminlerin drenajsız kayma direncine etkisi", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2019.
- [35] U.M. Türkel, "Bazalt fiber ve çimento katkısının zayıf zeminlerin geoteknik özelliklerine etkisinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, 2019.
- [36] A. Sungur, M.F. Yazıcı S.N. Keskin, "Bazalt lifi ile güçlendirilmiş killi zeminin mühendislik özellikleri üzerine deneysel araştırma", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Özel Sayı*, 28, 895-899, 2021, <https://doi.org/10.31590/ejosat.1011881>
- [37] S. Terzi, "Killi zeminlerin kayma direncine bazalt fiberin katkısı", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2021.
- [38] J. Xu, Z. Wua, H. Chena, L. Shaoc, X. Zhoue, S. Wange, "Triaxial shear behavior of basalt fiber-reinforced loess based on digital image technology", *KSCE Journal of Civil Engineering* 25(10), 3714-3726, 2021.
- [39] N. Zhao, H. Wu, Z. Huang, "Strength behavior of red clay reinforced by basalt chopped fiber", *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 2021.
- [40] O. Saran, A. Demiröz, "Zemin stabilizasyonunda bazalt fiber ve uçucu kül kullanımının araştırılması", *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10, 495-511, 2022.
- [41] Z. Gürocak ve Y. Aslan Topçuoğlu (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>
- [42] Y. Önem, "Sanayi Madenleri," Kozan Ofset, Ankara, 2000.
- [43] A. Akbulut, "Bentonit," MTA Eğitim Serisi-32, Ankara, 1996.
- [44] S. Genç, "Şişen Zeminler ve Bentonit-kaolin karışımlarının şişme özellikleri," Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 2009.
- [45] Y. Aslan Topçuoğlu, "Farklı katkı maddelerinin zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi," Doktora tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2020.
- [46] D. Saravanan, "Spinning the rocks-basalt fibers. Journal of the Institute of Engineers (India)", *Textile Engineering Division*, 86, 39-45, 2006.
- [47] H. Jamshaid, R. Mishra, "A green material from rock: basalt fiber-a review", *The Journal of The Textile Institute*, 107(7), 923-937, 2015, <https://doi.org/10.1080/00405000.2015.1071940>
- [48] L. Gao, G. Hu, N. Xu, J. Fu, C. Xiang, C. Yang, "Experimental study on unconfined compressive strength of basalt fiber reinforced clay soil", *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-8, 2015, <https://doi.org/10.1155/2015/561293>

- [49] A.S. Soğancı, “The effect of polypropylene fiber in the stabilization of expansive soils”, *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 9(8), 994-997, 2015.
- [50] P.V. Motiram, C. Rohit, K. Tushar, C. Ayushi, G. Bhushan, C Deepali, “Study of basalt fiber on compaction characteristics of black cotton soil”, *International Journal for Research in Engineering Application Management (IJREAM)*, 850-853, 2018.
- [51] K.Q. Tran, T. Satomi, H. Takahashi, “Effect of waste cornsilk fiber reinforcement on mechanical properties of soft soils”, *Transportation Geotechnics*, 16, 76-84, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.07.003>
- [52] C. Liu, Y. Lv, X. Yu, X. Wu, “Effects of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of straw fiberreinforced soil”, *Geotextiles and Geomembranes*, 48(4), 581-590, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2020.03.004>
- [53] Standard Test Methods for Liquid Limit. Plastic Limit and Plasticity Index of Soils. American Society for Testing and Materials, ASTM D4318-17e1, 2017.
- [54] Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, American Society for Testing and Materials ASTM D698- 12e2, 2012.
- [55] Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, American Society for Testing and Materials ASTM D2166M-16, 2016.