

Farklı katkı maddelerinin kil zeminlerin taşıma kapasitesine etkisinin araştırılması

Investigation of the effect of different additives on the bearing capacity of clay soils

Onur Saran^{1,*}, Atila Demiröz²

¹ Van Yüzcüncü Yıl Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 65090, Van Türkiye

² Konya Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya, Türkiye

Öz

Yüksek plastisiteye sahip şişen killerin, nem dalgalanmalarıyla yaşanan aşırı hacim değişimlerinden kaynaklanabilecek tehlikeleri önlemek için stabilize edilmesi gerekir. Bu tür zeminleri stabilize etmek için kimyasal stabilizasyon yönteminin kullanımı yaygındır. Çimento ve kirecin yanısıra uçucu kül gibi pozzolanik özellik gösteren katkı malzemeleri kimyasal stabilizasyonda sıklıkla kullanılır. Son yıllarda, zemin stabilizasyonunda yapay ve doğal fiberlerin kullanımı da artmaktadır. İnşaat mühendisliğinde, özellikle betonun mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılan bazalt fiberlerin, geoteknik mühendisliğinin bir uygulama alanı olan zemin güçlendirme çalışmalarında da kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.

Çalışmada, bazalt fiber ve pozzolanik katkı (uçucu kül ve silis dumanı) zeminlerin taşıma gücü arazi temsiliyeti açısından büyük ölçekli deneylerle araştırılmıştır. Dayanım deneylerinde en iyi mukavemet özelliklerinin elde edildiği tasarımlar ve katkısız zeminde model şerit temel yüklemesi yapılmıştır. Kil zeminin taşıma gücünde ciddi ölçüde artış meydana gelmiştir. Kil zeminde elde edilen taşıma gücü, BF+SD takviyeli zeminde %758, BF+UK takviyeli zeminde ise %605 artmıştır. Ayrıca, BF+SD ve BF+UK takviyeli zeminlerde katkısız zemine göre taban basıncı-oturma grafiğinde kırılma noktası belirgindir ve deney sonunda daha net kayma yüzeyleri elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Bazalt fiber, Dayanım, Silis dumanı, Uçucu kül, Zemin stabilizasyonu

Abstract

Swelling clays with high plasticity need to be stabilized to prevent hazards from excessive volume changes due to moisture variations. The use of chemical stabilization methods is common for stabilizing such soils. In addition to cement and lime, pozzolanic additives such as fly ash are frequently used in chemical stabilization. In recent years, the use of artificial and natural fibers in soil stabilization has also increased. In Civil Engineering, basalt fibers, which are used especially to improve the mechanical properties of concrete, are also increasingly used in soil reinforcement studies, which is an application area of geotechnical engineering.

In this study, the bearing capacity of basalt fiber and pozzolan admixed soils (fly ash and silica fume) were investigated with large-scale experiments in terms of field representation. Model strip foundation loading was performed on clay soil and for the designs with the best strength properties in strength tests. There was a significant increase in the bearing capacity of the clay soil. The bearing capacity of clay soil increased by 758% for BF+SF reinforced soil and by 605% for BF+FA reinforced soil. In addition, for BF+SF and BF+FA reinforced soils, the fracture point is more prominent in the base pressure - settlement graph compared to the clay soil and clearer shear surfaces were obtained at the end of the experiment.

Keywords: Basalt fiber, Strength, Silica fume, Fly Ash, Soil stabilization

1 Giriş

Kentleşmenin hızla yayılması, genellikle zemin iyileştirmesi gerektiren zayıf veya yumuşak zeminler üzerine inşaat yapılmasını gerekli kılmıştır [1]. Özellikle şişen zeminler, suyla temas etmesi halinde mukavemet ve stabilize sorunlarının yaygın olarak yaşandığı en sorunlu zemin tiplerinden biridir [2]. Likit limitin %50 ve plastisite indisinin de %30'dan yüksek olduğu zeminler yüksek plastisiteli killer olarak kabul edilir ve yapılar için potansiyel risk oluşturan şişen zemin grubunda sayılır [3]. Şişen zeminler, su içeriğindeki değişikliklere duyarlı oldukları için yapısal yükler altında düşük performansa sahiptir [4]. Şişen

zeminlerin kararsızlığı, nem içeriğindeki bir değişikliğe maruz kaldığında zeminlerin büzülmesine veya şişmesine neden olan yüksek kil içeriğinden kaynaklanmaktadır. Şişen zeminler üzerine inşaat yapmak; yapı temellerinde, setlerde, yol ve kaldırımlarda önemli hasara yol açabilir ve dayanıklı ve güvenli yapılar inşa etme maliyetini artırabilir. Bu zorluklarla başa çıkmak için, bu şişen zeminlerin geoteknik özelliklerini iyileştirmek amacıyla stabilize edilmesi ve güçlendirilmesi hayati önem taşımaktadır [5]. Geleneksel olarak, çimento, kireç ve kireç-çimento karışımları gibi katkı maddelerinin ilave edilmesi yaygın olarak uygulanmaktadır [6-10]. Problemlili zeminin belirli bir derinliğe kadar yüksek

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: onursaran@yyu.edu.tr (O. Saran)

Geliş / Received: 09.04.2025 Kabul / Accepted: 14.10.2025 Yayınlanma / Published: 15.01.2026

doi: 10.28948/ngumuh.1672099

mukavemetli zeminle değiştirilmesi de yaygın kullanılan uygulamalardan biridir [11]. Tüm bu yöntemler arasında, çimento kullanılarak yapılan kimyasal stabilizasyon, zayıf zeminlerin performansını iyileştirmek için etkili bir teknik olarak yaygın bir şekilde uygulanmıştır. 1 ton Çimento üretimi için yaklaşık 1.7 ton hammadde kullanır ve yanma işlemi sırasında yaklaşık 1 ton CO₂ ortaya çıkar [12, 13]. Bu nedenle, çimento üretiminden kaynaklanan artan çevresel endişelerle birlikte, çimento kullanımını kısmen veya tamamen azaltmak için alternatif yaklaşımlar incelenmektedir [14]. Ayrıca, kimyasal stabilizasyonda, kömürle çalışan termik santrallerde bir yan ürün olarak ortaya çıkan uçucu kül ve metal endüstrisinin yan ürünü olan silis dumanı gibi puzolanik katkılarda kullanılmaktadır [15-21].

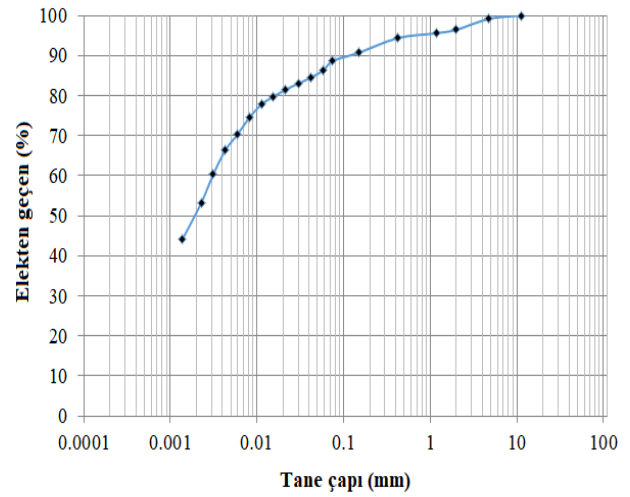
Son yıllarda, zemin iyileştirmede geleneksel yöntemlere alternatif olarak fiber (cam, polipropilen, bazalt vb.) kullanımı dikkate değer gelişmeler göstermiştir. Ekincioglu [22], fiberleri doğal olarak bulunabilen veya yapay olarak üretilen, bir boyutu diğer boyutlarına göre oldukça büyük olan ve aynı malzemenin kütsel formuna kıyasla daha yüksek mukavemet ve elastisite modülüne sahip malzemeler olarak tanımlamaktadır. Doğal ve yapay olmak üzere iki fiber türünden yapay olanı daha çok kullanılmaktadır. Yapay fiberler, yüksek mukavemete sahip, hafif, esnek ve çevresel etkilere karşı oldukça dayanıklı oldukları için tercih edilmektedir [23]. Cam fiber [24-26], polipropilen fiber [27, 28] ve karbon fiber [29], birçok çalışmada takviye olarak kullanılmış olup, bu fiberleri takviye olarak kullanan çalışmalarda zemin özelliklerinde iyileşmeler olduğu belirtilmiştir. Bu fiberlerden biri de son yıllarda dikkat çeken ve bazalt kayacından üretilen bazalt fiberlerdir (BF). BF'ler yüksek kimyasal direnç ve sıcaklık ve mikroorganizma etkilerine karşı direnç gibi üstün özelliklere sahiptir. Üretim sırasında hiçbir katkı maddesi kullanılmaması da BF'ler için bir avantajdır. BF takviyesi ile zemin takviye çalışmaları incelendiğinde, BF uzunluğunun ve oranının başarılı takviye için önemli olduğu görülmektedir. Bol miktarda bulunan bazalt kayacından elde edilen BF, ekonomik ve doğal özellikleri, çevre dostu olması, sürdürülebilirliği ve yüksek çekme mukavemeti nedeniyle diğer fiber türlerine göre giderek daha fazla tercih edilir hale gelmiştir [30-33].

Bu çalışmada; bazalt fiber, uçucu kül ve silis dumanı katkılarının kil zeminin taşıma gücüne etkisi incelenmiştir. Katkısız zemin ve katkılı zemin numuneleri üzerinde model şerit temel kullanılarak laboratuvar ortamında büyük ölçekli taşıma gücü deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda uçucu kül ve silis dumanının puzolanik etkinliğini arttırmak amacıyla karışımlara %3 kireç ilavesi yapılmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Zemin özellikleri

Çalışmada yüksek plastisiteli kil (CH) zemin kullanılmıştır. Zeminin temel fiziksel özelliklerini belirlemek için ilgili ASTM standardına göre ıslak elek analizi, hidrometre testi, Atterberg limitleri ve piknometre deneyleri yapılmıştır. Zeminin granülometri eğrisi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Zemine ait tane dağılım eğrisi

Çalışmada kullanılan kil zeminin temel fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Zeminin fiziksel özellikleri

Özellik	Değer	Standart
Özgül ağırlık	2.65	ASTM D 854
Likit limit, w_L (%)	104.4	ASTM D 4318
Plastik limit, w_p (%)	31	ASTM D 4318
Plastisite indisi (PI) (%)	73.8	ASTM D 4318
Zemin sınıfı (USCS)	CH	ASTM D 2487
Optimum su muhtevası, w_{opt} (%)	28.5	ASTM D 698
Maksimum kuru yoğunluk, γ_{kmax} (g/cm ³)	1.45	ASTM D 698

2.2 Katkı malzemelerinin özellikleri

Kireç (K): Çalışmada Erciyes TS EN 459-1 CL 80-S sönmüş kireç kullanılmıştır.

Uçucu Kül (UK): Kömürle çalışan termik santrallerin yan ürünüdür. Yüksek miktarda silika ve alümina içerir. Deneysel çalışmalarda F tipi uçucu kül kullanılmış olup Kütahya Seyitömer Termik Santrali tarafından tedarik edilmiştir.

Silis Dumanı (SD): Silisyum metal veya ferro-silisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi sırasında açığa çıkan atık malzemedir. Antalya Elektrometalurji A.Ş.'den temin edilmiştir.

Çalışmada kullanılan katkı malzemelerinin kimyasal içerikleri Tablo 2'de verilmiştir. Uçucu kül ve silis dumanının fiziksel özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Bazalt Fiber (BF): Çalışmada kullanılan bazalt fiberler Spinteks Tekstil İnşaat Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi (Denizli/Türkiye) tarafından tedarik edilmiştir. Çalışmada; 6, 12, 18 ve 24 mm uzunluğundaki bazalt fiberler kullanılmıştır (Şekil 2). Tablo 4 bazalt fiberlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini göstermektedir.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan katkı malzemelerinin kimyasal içerikleri

Kimyasal içerik	Silis Dumanı (SD)	Uçucu Kül (UK)	Kireç (K)
SiO ₂ (%)	79.94	54.49	-
Al ₂ O ₃ (%)	0.83	20.58	-
Fe ₂ O ₃ (%)	0.41	9.27	-
CaO (%)	2.53	4.26	≥80
MgO (%)	7.68	4.48	≤5
K ₂ O (%)	-	2.01	-
SO ₃ (%)	-	0.52	≤2
C (%)	1.22	-	-
S (%)	0.923	-	-
CO ₂ (%)	-	-	≤7
Kızdırma Kaybı (%)	2.96	3.01	-

Tablo 3. Uçucu kül ve silis dumanının fiziksel özellikleri

Özellik	Uçucu Kül (UK)	Silis Dumanı (SD)
Kum yüzdesi 4,75–0,075 mm (%)	6	0.91
Silt yüzdesi 0,075–0,002 mm (%)	81.8	1.71
Kil yüzdesi <0,002 mm (%)	12.2	97.38
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2.04	0.199



Şekil 2. Bazalt fiber

Tablo 4. Bazalt fiberin fiziksel ve mekanik özellikleri

Bazalt Fiber		
Özellik	Değer	Birim
Özgül ağırlık	2.60 - 2.65	kN/m ³
Elastik modül	70 - 90	GPa
Çekme dayanımı	2800 - 3300	MPa
Kopma anındaki uzama	3.1 - 6	%
Çap	6 - 25	µm
Erime sıcaklığı	1350	°C

2.3 Optimum katkı içerikleri

Model şerit temel yükleme deneyleri katkısız kil zeminde ve katkı maddelerinin optimum seviyelerinde hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bazalt fiber içeriği ve uzunluğu, uçucu kül içeriği, silis dumanı içeriği ve kür süresi parametrelerinin optimum seviyelerini belirlemek için öncelikle Taguchi yöntemi kullanılarak iki (2) farklı deney tasarımı yapılmıştır. Optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluk değerlerinde sıkıştırılan numuneler daha sonra deney tablosunda belirtilen süreler boyunca kürlenmeye bırakılmıştır. Kür süresince su içinde herhangi bir değişiklik olmaması için numuneler hava almayacak şekilde poşetlenerek güneş ışığına maruz kalmayan bölmelerde, %95 bağıl nem içeren kaplarda ve oda sıcaklığında

kürlenmeye bırakılmıştır. Daha sonra her karışım için ilgili kür süresi sonunda serbest basınç deneyleri yapılarak optimum parametreler belirlenmiştir (Tablo 5 ve Tablo 6). Optimum katkı seviyeleri; Bazalt içeriği %1, BF uzunluğu 18 mm, uçucu kül içeriği %10, silis dumanı içeriği %10 ve kür süresi 56 gün olarak belirlenmiştir.

Tablo 5. Taguchi L₁₆ ortogonal deney tablosu (BF+UK) ve serbest basınç dayanımı değerleri

Tasarım no	BF uzunluğu (mm)	BF içeriği (%)	Kür süresi (gün)	UK içeriği (%)	ρ _{k,max} (g/cm ³)	W _{opt} (%)	q _u (kPa)
1	6	0	1	0	1.394	32.0	296.7
2	6	0.5	7	5	1.349	33.0	813.7
3	6	1	28	10	1.340	33.5	1205.1
4	6	1.5	56	15	1.314	34.4	1194.0
5	12	0	7	10	1.338	33.7	1005.7
6	12	0.5	1	15	1.311	34.3	529.7
7	12	1	56	0	1.386	31.9	961.3
8	12	1.5	28	5	1.356	33.1	1064.4
9	18	0	28	15	1.320	34.3	1119.7
10	18	0.5	56	10	1.332	33.4	1354.0
11	18	1	1	5	1.350	33.0	513.8
12	18	1.5	7	0	1.379	31.8	761.6
13	24	0	56	5	1.356	33.2	819.8
14	24	0.5	28	0	1.384	31.9	847.3
15	24	1	7	15	1.311	34.4	1179.8
16	24	1.5	1	10	1.327	33.6	531.1

Tablo 6. Taguchi L₁₆ ortogonal deney tablosu (BF+SD) ve serbest basınç dayanımı değerleri

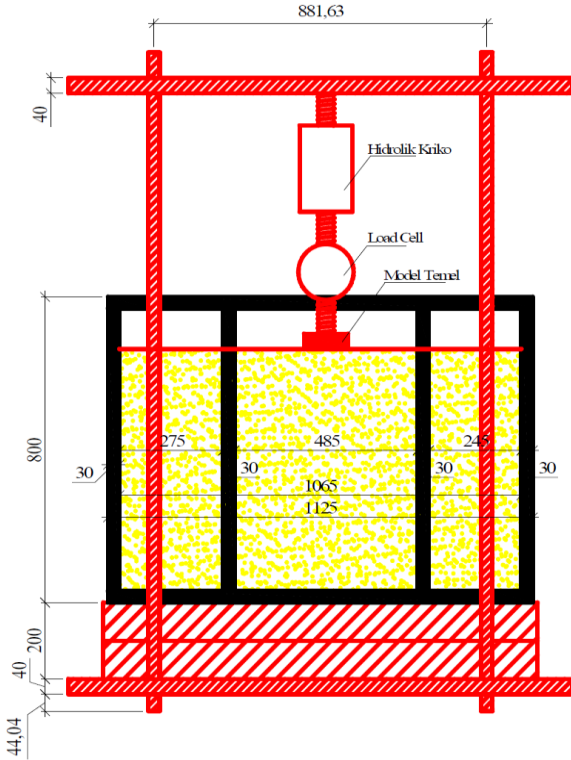
Tasarım no	BF uzunluğu (mm)	BF içeriği (%)	Kür süresi (gün)	SD içeriği (%)	ρ _{k,max} (g/cm ³)	W _{opt} (%)	q _u (kPa)
1	6	0	1	0	1.394	32.0	296.7
2	6	0.5	7	5	1.380	32.6	874.9
3	6	1	28	10	1.360	32.7	1299.9
4	6	1.5	56	15	1.336	33.7	1326.5
5	12	0	7	10	1.358	33.0	1081.4
6	12	0.5	1	15	1.333	33.5	593.6
7	12	1	56	0	1.386	31.9	961.3
8	12	1.5	28	5	1.367	32.7	1157
9	18	0	28	15	1.340	33.7	1181.6
10	18	0.5	56	10	1.351	33.0	1521.3
11	18	1	1	5	1.375	32.7	558.5
12	18	1.5	7	0	1.379	31.8	761.6
13	24	0	56	5	1.374	32.7	881.5
14	24	0.5	28	0	1.384	31.9	847.3
15	24	1	7	15	1.339	33.8	1282.4
16	24	1.5	1	10	1.352	32.9	565.4

2.4 Büyük ölçekli deneyler

Çalışmada, bazalt fiber ve mineral katkılı (kireç, uçucu kül ve silis dumanı) zeminlerin taşıma gücü arazi temsiliyeti açısından ve iyileştirilecek olan zemin özellikleri dikkate alınarak büyük ölçekli deneylerle araştırılmıştır. Oluşturulan deney tasarımları üzerinde yapılan serbest basınç deneylerinde en iyi mukavemet özelliklerinin elde edildiği karışımlar ve katkısız zemin için model şerit temel yüklemesi yapılmıştır.

Deneyler için Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarında bulunan ve Demiröz (2008) doktora tez çalışması kapsamında imal edilen deney düzeneği kullanılmıştır. Deney tankı 30 cm genişlik, 112.50 cm uzunluk ve 80 cm yüksekliğe sahiptir.

Tankın ön ve arka yüzlerinde 15 mm kalınlığında temperli cam plakalar, yan yüzeylerinde ise 3 mm et kalınlığına sahip çelik saç bulunmaktadır. Tankın tüm yüzeyleri 30×30 mm kutu profiller ile desteklenmiştir. Böylece, deney sırasında düşey yüklerden dolayı yan duvarlarda meydana gelebilecek deformasyonların önlenmesi için tankın rijitliği artırılmıştır. Ayrıca, deney sırasında meydana gelecek deformasyonların sınırlı kalması için tankın üst kısmında 3 mm et kalınlığında, 80 mm genişliğinde dört adet U kesitli çelik profil ile destek yapılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Deney düzeneği (ölçüler mm) (Demiröz, 2008) [34]

Deneylerde model temelin sabit bir hızla yüklenebilmesi için yükleme hızı ayarlanabilen Tekno-Dinamik tarafından üretilen 200 kN kapasiteli, hidrolik pres kullanılmıştır. Deneyisel çalışmada 100×292 mm boyutlarında şerit temel tipi esas alınmıştır. Temel 40 mm kalınlığında rijit çelik plakalardan oluşturulmuştur (Şekil 4). Model temelin tabanına, sürtünme (pürüzlü bir yüzey) sağlamak amacıyla zımpara kâğıdı yapıştırılmıştır.

Deney tankı içerisinde 45 cm kum, 30 cm kil zemin (optimum tasarımlar ve katkısız zemin) olacak şekilde deney numuneleri hazırlanmıştır. Yükleme sırasında kum zeminde oluşabilecek büyük deformasyonları engellemek için kum zemin, rölatif sıkılığı $Dr=70\%$ (sıkı) olacak şekilde 5 cm'lik tabakalar halinde serilmiştir. Kil zemin ise optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunluk değerinde 5 cm'lik tabakalar halinde sıkıştırılmıştır. Zemin tabakaları hacim kontrollü olarak sıkıştırılmıştır. 5 cm kalınlık için gereken zemin miktarı tank içerisine yerleştirildikten sonra üzerine ağırlık düşürülerek istenilen hacme getirilmiştir.



Şekil 4. Deneylerde kullanılan model şerit temelin görünümü

Her tabaka için gereken kum zemin önce %3 su içeriğinde homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Daha sonra tank içerisine aktarılmıştır (Şekil 5). Zemini istenilen sıklığa getirmek için dikdörtgen taban alanlı ağırlık kullanılmıştır (Şekil 6). Kum zeminin indeks özellikleri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Kum zeminin indeks özellikleri

Özgül ağırlık (G_s)	2.65
Minimum boşluk oranı (e_{min})	0.37
Maksimum boşluk oranı (e_{max})	0.75
Maksimum kuru yoğunluk, $\rho_{k,max}$ (kN/m^3)	1.935
Minimum kuru yoğunluk, $\rho_{k,min}$ (kN/m^3)	1.515



Şekil 5. Kum zeminin karıştırılması ve tank içerisine aktarılması



Şekil 6. Kum zeminin sıkıştırılmış hali

Kum zemin istenilen sıklıkta serildikten sonra kil zemin optimum su içeriğine getirilerek tank içerisinde 5 cm tabakalar halinde sıkıştırılmıştır (Şekil 7). Sıkıştırılan zemin kürlenmeye bırakılmıştır. Kür süresi boyunca su içeriğinde bir değişiklik olmaması için deney tankı hava almayacak şekilde kapatılmıştır. Deney programındaki optimum parametreler için de benzer şekilde zemin ortamı oluşturulup temel yüklemeleri yapılmıştır.



Şekil 7. Kil zeminin optimum su muhtevasına getirildikten sonra sıkıştırılması

3 Bulgular ve tartışma

Deney numuneleri, kompaksiyon deneyinde elde edilen optimum su muhtevası ve maksimum yoğunluk değerlerinde hacim kontrollü olarak sıkıştırılmıştır. İlk olarak katkısız zemin üzerinde deney yapılmıştır. Tank içerisinde sıkıştırılan zemin üzerine model şerit temel yerleştirilerek yüklenmiştir (Şekil 8). Deney sırasında yük ve deformasyon değerleri ölçülmüştür. Taban basıncı-oturma eğrisi çizilerek taşıma gücü belirlenmiştir.

Deney sırasında tankın yanal yüzeylerinde oluşan deformasyonları ölçmek için kısa ve uzun kenarlarına deformasyon saatleri yerleştirilmiştir (Şekil 9). Deney sırasında düşey yüklerden dolayı yan duvarlarda meydana gelen deformasyonların ihmal edilebilir seviyelerde ($<0.2\%$) olduğu belirlenmiştir.

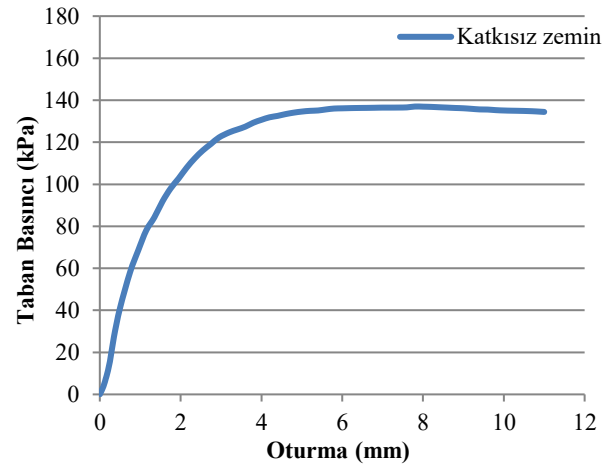


Şekil 8. Katkısız zemin üzerine yerleştirilen temelin yüklenmesi



Şekil 9. Tankın yanal yüzeylerindeki deformasyonların ölçülmesi

Katkısız zemin üzerinde gerçekleştirilen deneyin taban basıncı-oturma grafiği Şekil 10'da verilmiştir. Katkısız zemin üzerine yerleştirilen temelin taşıma gücü 136.99 kPa olarak belirlenmiştir. Deney sonunda oluşan kayma yüzeyi Şekil 11'de görülmektedir. Taban basıncı-oturma grafiğinde kırılma noktası belirgin değildir.

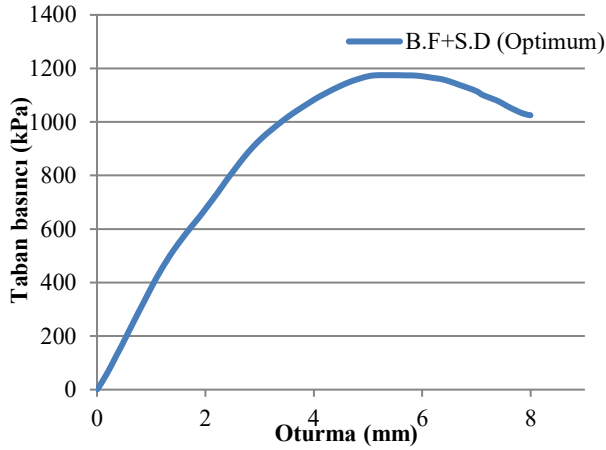


Şekil 10. Tankın yanal yüzeylerindeki deformasyonların ölçülmesi



Şekil 11. Yükleme sonrası zeminin görünümü

Bazalt fiber ve silis dumanı katkılı (ayrıca %3 kireç) karışımlar için yapılan dayanım deneylerinde optimum parametreler ve seviyeleri bazalt fiber uzunluğu 18 mm, bazalt fiber içeriği %1, kür süresi 56 gün ve silis dumanı %10 olarak belirlenmiştir. Bu parametre seviyeleri için tank içerisinde hazırlanan karışım üzerinde yapılan deneyde temelin taşıma gücü 1174.82 kPa olarak belirlenmiştir (Şekil 12). Deney sonunda katkısız zemine göre daha net kayma yüzeyleri oluşmuştur (Şekil 13). Ayrıca taban basıncı-oturma grafiğinde kırılma noktası belirgindir.

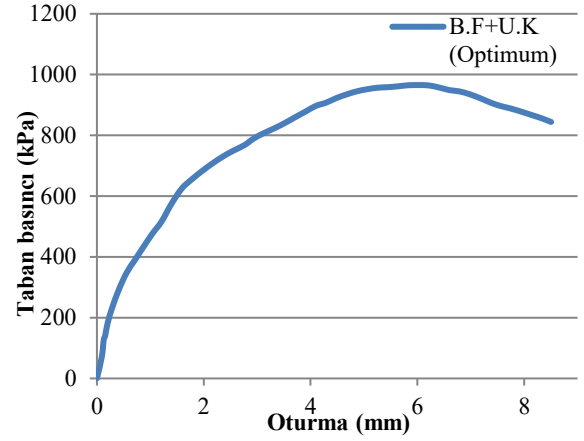


Şekil 12. BF+SD katkılı zemin üzerinde gerçekleştirilen deneyin taban basıncı-oturma grafiği

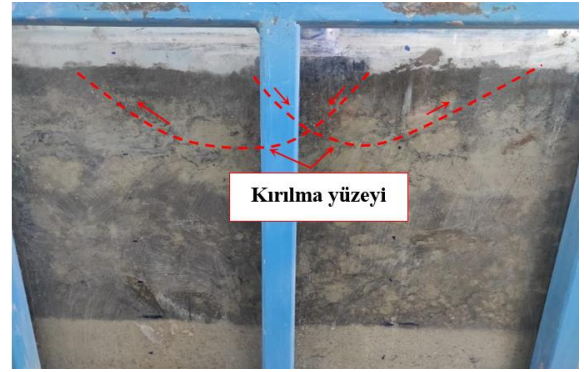


Şekil 13. BF+SD katkılı zeminin yükleme sonrası görünümü

Bazalt fiber ve uçucu kül katkılı (ayrıca %3 kireç) karışımlar için yapılan dayanım deneylerinde optimum parametreler ve seviyeleri bazalt fiber uzunluğu 18 mm, bazalt fiber içeriği %1, kür süresi 56 gün ve uçucu kül %10 olarak belirlenmiştir. Bu parametre seviyeleri için tank içerisinde hazırlanan karışım üzerinde yapılan deneyde ise temelin taşıma gücü 965.42 kPa olarak belirlenmiştir (Şekil 14). BF+SD katkılı zemine benzer şekilde deney sonunda katkısız zemine göre kayma yüzeyleri daha net (Şekil 15) ve taban basıncı-oturma grafiğinde kırılma noktası belirgindir (Şekil 14).

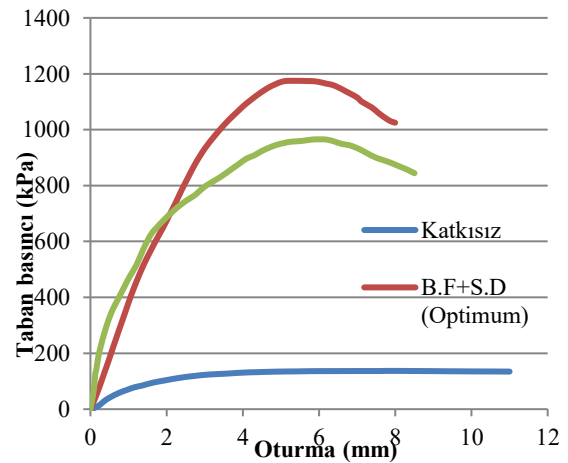


Şekil 14. BF+UK katkılı zemin üzerinde gerçekleştirilen deneyin taban basıncı-oturma grafiği



Şekil 15. BF+UK katkılı zeminin yükleme sonrası görünümü

Katkısız ve katkılı numunelerin yükleme grafikleri Şekil 16'da verilmiştir. Katkısız zeminde elde edilen taşıma gücü, BF+SD katkılı zeminde 8.58 katına, BF+UK katkılı zeminde ise 7.05 katına çıkmıştır.



Şekil 16. Katkısız ve katkılı numunelerin yükleme grafikleri

Kullanılan katkıları ile katkısız zemin numunesinin dayanımında önemli ölçüde artış meydana gelmiştir. Bu dayanım artışının en önemli sebebi kireç-uçucu kül ve kireç-

silis dumanı ile zemin arasında meydana gelen kısa (katyon değişimi ve flokülasyon) ve uzun vadeli (puzolanik reaksiyon) reaksiyonlardır. Katyon değişimi, tek değerlikli iyonların kalsiyum iyonları ile yer değiştirmesi ile zemin parçacıkları arasındaki çekimin artmasına neden olur. Floklar, çekim ve katyon değişimi sonucunda zemin taneciklerinin birbirine yaklaşmasıyla oluşur. Katkılı numunelerde meydana gelen katyon değiştirme ve flokülasyon olayları zemin numunelerinde daha düşük şişme potansiyeli, plastisite ve daha yüksek geçirgenlik katsayısı ile daha granüler bir yapı ile sonuçlanmıştır. Ayrıca puzolanik reaksiyonlar sonucunda, uzun vadeli mukavemet kazanımı sağlayan ve geoteknik özellikleri iyileştiren kararlı kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum alüminat hidrat (C-A-H) jelleri oluşmuştur [35,36].

Yapılan deneylerde silis dumanı katkıli karışımların taşıma gücü değerleri uçucu kül katkıli karışımlara göre daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, silis dumanının daha ince taneli olması ve bu nedenle daha yüksek puzolanik aktivite göstermesinden kaynaklanmaktadır.

Zemine fiber eklendiğinde, fiber ile zemin arasındaki mekanizma şu şekilde açıklanır; Zemine uygun miktarda (optimum) fiber eklendiğinde, fiberler zemin parçacıklarına bağlanır ve bir fiber-zemin kolonu oluşturur. Zemin kütlesi dış kuvvetlere maruz kaldığında, ayrı zemin-fiber kolonları birbirleriyle etkileşime girerek üç boyutlu bir fiber-zemin ağı oluşturur. Bu durum zemin parçacıklarının yer değiştirmesini ve deformasyonunu sınırlamaya yarar. Böylece zeminin mekanik özellikleri iyileşir [37].

4 Sonuçlar

Çalışmada uygulanan zemin stabilizasyonunu arazi temsiliyeti açısından değerlendirmek için model şerit temel ile katkısız ve katkıli (optimum parametre seviyeleri kullanılarak) numuneler üzerinde yapılan büyük ölçekli deneylerde, katkısız zeminin taşıma gücünde önemli ölçüde artış meydana gelmiştir.

Bazalt fiber+silis dumanı katkıli karışımda, katkısız zeminin taşıma gücü 136.99 kPa'dan 1174.82 kPa'a, bazalt fiber+uçucu kül katkıli karışımda ise 965.42 kPa'a yükselmiştir.

Katkılı numunelerde, katkısız zemine göre daha net kayma yüzeyleri oluşmuştur. Ayrıca taban basıncı-oturma grafiğinde kırılma noktası belirgindir.

Katkısız zeminde elde edilen taşıma gücü, BF+SD takviyeli zeminde %758, BF+UK takviyeli zeminde ise %605 artmıştır.

Bazalt fiber, uçucu kül ve silis dumanı katkıli malzemelerinin zemin stabilizasyonunda etkili bir şekilde kullanılabileceği belirlenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %15

Kaynaklar

[1] S.M. Hejazi, M. Sheikhzadeh, S.M. Abtahi, A. Zadhoush, A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. Construction and

- Building Materials, 30, 100-116, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045>
- [2] 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, 2015(1), 561293, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/561293>
- [3] S. Sert, E. Arslan, P. Ocakbaşı, E. Ekinçi, Z. Garip, A. Özocak, C.P. Ndepete, Stabilization of expansive clays with basalt fibers and prediction of strength by machine learning. Arabian Journal for Science and Engineering, 49(10), 13651-13670, 2024. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-08752-w>
- [4] V. Ferber, J.C. Auriol, Y.J. Cui, J.P. Magnan, On the swelling potential of compacted high plasticity clays. Engineering Geology, 104(3-4), 200-210, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.10.008>
- [5] Y. Cai, M. Ou, Experimental study on expansive soil improved by lignin and its derivatives. Sustainability, 15(11), 8764, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15118764>
- [6] S. Horpibulsuk, R. Rachan, A. Chinkulkijniwat, Y. Raksachon, A. Suddepong, Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations. Construction and Building Materials, 24(10), 2011-2021, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.011>
- [7] A.S. Al-Gharbawi, A.M. Najemalden, M.Y. Fattah, Expansive soil stabilization with lime, cement, and silica fume. Applied Sciences, 13(1), 436, 2022. <https://doi.org/10.3390/app13010436>
- [8] M.K. Radwan, F.W. Lee, Y.B. Woon, M.K. Yew, K.H. Mo, S.H. Wai, A study of the strength performance of peat soil: A modified cement-based stabilization agent using fly ash and polypropylene fiber. Polymers, 13(23), 4059, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13234059>
- [9] A. Sorsa, Engineering properties of cement stabilized expansive clay soil. Civil and Environmental Engineering, 18(1), 332-339, 2022. <https://doi.org/10.2478/cee-2022-0031>
- [10] B. Shinde, A. Sangale, M. Pranita, J. Sanagle, C. Roham, Utilization of waste materials for soil stabilization: A comprehensive review. Progress in Engineering Science, 100009, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.pes.2024.100009>
- [11] M. Topolnicki, In situ soil mixing. Ground Improvement, 2, 331-428, 2004.
- [12] H.G. Van Oss, A.C. Padovani, Cement manufacture and the environment: Part I: Chemistry and technology. Journal of Industrial Ecology, 6(1), 89-105, 2002. <https://doi.org/10.1162/108819802320971650>
- [13] M.Ö.A. Akan, D.G. Dhavale, J. Sarkis, Greenhouse gas emissions in the construction industry: An analysis and evaluation of a concrete supply chain. Journal of Cleaner Production, 167, 1195-1207, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.225>
- [14] M.B. Ali, R. Saidur, M.S. Hossain, A review on emission analysis in cement industries. Renewable and

- Sustainable Energy Reviews, 15(5), 2252-2261, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.014>
- [15] A.R. Goodarzi, H.R. Akbari, M.J. Salimi, Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume. *Applied Clay Science*, 132, 675-684, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.08.023>
- [16] M. Türköz, H. Savaş, G. Tasci, The effect of silica fume and lime on geotechnical properties of a clay soil showing both swelling and dispersive features. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 1-14, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4045-x>
- [17] S. Ghavami, H. Naseri, H. Jahanbakhsh, F.M. Nejad, The impacts of nano-SiO₂ and silica fume on cement kiln dust treated soil as a sustainable cement-free stabilizer. *Construction and Building Materials*, 285, 122918, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122918>
- [18] A.J. Alrubaye, M. Hasan, M.Y. Fattah, Stabilization of soft kaolin clay with silica fume and lime. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 11(1), 90-96, 2017. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1187884>
- [19] Ö. Çimen, E. Keleş, Yüksek plastisiteli bir kilin mühendislik özelliklerine uçucu kül ve kireç katkılarının etkisi. *İleri Mühendislik Çalışmaları ve Teknolojileri Dergisi*, 1(2), 80-90, 2020.
- [20] K. Dehghanian, Killi zeminlerin özelliklerinin uçucu kül kullanarak iyileştirilmesi. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 66-72, 2021.
- [21] C. Turan, A.A. Javadi, R. Vinai, R. Beig Zali, Geotechnical characteristics of fine-grained soils stabilized with fly ash: A review. *Sustainability*, 14(24), 16710, 2022. <https://doi.org/10.3390/su142416710>
- [22] Ö. Ekincioglu, Mechanical behavior of cement based composites reinforced with hybrid fibres – an optimum design. Master's Thesis, Istanbul Technical University, 2003.
- [23] Y.A. Topçuoğlu, Z. Gürocak, Increasing strength of clay soils with the use of basalt fiber: An experimental study. *Turkish Journal of Science and Technology*, 19(1), 87-96, 2024. <https://doi.org/10.55525/tjst.1398354>
- [24] G.G. Naidu, R. Ramakrishna, B.G. Ezri, Strengthening of soil by adding lime and glass fiber as stabilizing materials for the construction of high rise buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1126(1), 012070, 2021.
- [25] G.M. Ayininuola, L.O. Balogun, Investigation of glass fiber potential in soil stabilization. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 7(5), 113-117, 2018.
- [26] M. Valipour, P.T. Shourijeh, A. Mohammadinia, Application of recycled tire polymer fibers and glass fibers for clay reinforcement. *Transportation Geotechnics*, 27, 100474, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100474>
- [27] M. Hamza, N. Ijaz, Z. Ijaz, Stabilization of problematic expansive clays using polypropylene fiber reinforcement. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 16(4), 2022.
- [28] N. Tiwari, N. Satyam, An experimental study on strength improvement of expansive subgrades by polypropylene fibers and geogrid reinforcement. *Scientific Reports*, 12, 6685, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10773-0>
- [29] X. Bao, Y. Huang, Z. Jin, X. Xiao, W. Tang, H. Cui, X. Chen, Experimental investigation on mechanical properties of clay soil reinforced with carbon fiber. *Construction and Building Materials*, 280, 122517, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122517>
- [30] X.S. Zhuang, X.Y. Yu, Experimental study on strength characteristics of lime-basalt fiber reinforced expansive soil. *Applied Mechanics and Materials*, 744, 495-498, 2015.
- [31] S. Wang, F. Chen, Q. Xue, P. Zhang, Splitting tensile strength of cement soil reinforced with basalt fibers. *Materials*, 13(14), 3110, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13143110>
- [32] O. Saran, A. Demiröz, Enhancement of the strength and permeability properties of an expansive soil using chopped basalt fibers and silica fume. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 9(1), 9, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40891-023-00431-4>
- [33] O. Saran, A. Demiröz, Zemin stabilizasyonunda bazalt fiber ve uçucu kül kullanımının araştırılması. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 10(2), 495-511, 2022.
- [34] A. Demiröz, Geogrid donatılı kum üzerine oturan sürekli temellerde taşıma gücünü etkileyen tasarım faktörlerinin deneysel olarak araştırılması. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, 2008.
- [35] J. Mallela, H.V. Quintus, K. Smith, Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design. *National Lime Association*, 200(1), 1-40, 2004.
- [36] A.A. Al-Rawas, A.W. Hago, H. Al-Sarmi, Effect of lime, cement and Sarooj on the swelling potential of an expansive soil from Oman. *Building and Environment*, 40(5), 681-687, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.028>
- [37] Y. Song, Y. Geng, S. Dong, S. Ding, K. Xu, R. Yan, F. Liu, Study on mechanical properties and microstructure of basalt fiber-modified red clay. *Sustainability*, 15(5), 4411, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15054411>

