



ZEMİN STABİLİZASYONUNDA BAZALT FİBER VE UÇUCU KÜL KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

¹Onur SARAN , ²Atila DEMİRÖZ 

^{1,2}Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya,
TÜRKİYE

¹osaran@ktun.edu.tr, ²ademiroz@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 14.04.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 21.05.2022)

ÖZ: Killer plastik davranış gösteren, yüksek su içeriklerinde dayanımları önemli ölçüde azalan ve yüksek miktarda oturma yapabilen zeminlerdir. Bu zeminler üzerinde inşaat yapılabilmesi için zeminin mühendislik özelliklerinin geliştirilmesi gerekir. Kil zeminlerin mühendislik özellikleri; çimento, kireç, uçucu kül vb. kimyasal katkılarla geliştirilebilmektedir. Ayrıca, son yıllarda fiberlerin zemin iyileştirmesinde kullanımına yönelik çalışmaların sayısı artmaktadır. Çalışmada, bazalt fiber ve uçucu kül katkılarının problemlili zeminlerin dayanım ve geçirimsizlik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla bazalt fiber uzunluğu (6-24 mm), bazalt fiber yüzdesi (%0-1.5), kür süresi (1-56 gün) ve uçucu kül yüzdesi (%0-15) değişken olarak seçilmiştir. Taguchi yöntemine özgü 4 parametrelili ve 4 seviyelili L₁₆ tasarım tablosu kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Optimum su muhtevası ve maksimum yoğunluk değerlerinde hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç, yarmada çekme ve permeabilite deneyleri yapılmıştır. Yapılan istatistiksel analizler sonucunda, serbest basınç ve yarmada çekme deneyleri için optimum parametreler; 18 mm bazalt fiber uzunluğu, %1 bazalt fiber, %10 uçucu kül ve 56 gün kür süresi olarak elde edilmiştir. Bazalt fiber uzunluğu ve içeriğinin artması ile permeabilite katsayısı yükselmiştir. Ancak uçucu kül yüzdesinin artmasıyla permeabilite katsayısı azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bazalt fiber, Uçucu kül, Zemin stabilizasyonu, Dayanım

Investigation of Basalt Fiber and Fly Ash Use in Soil Stabilization

ABSTRACT: Clays show plastic behavior, strength decreases significantly at high water contents, and these clays may settle in high amounts. In order to build on these soils, the engineering properties of the soil must be developed. Engineering properties of clays can be improved by inclusion of chemical admixtures including cement, lime, fly ash, etc. In addition, the number of studies on the use of fibers in soil improvement has been increasing in recent years. In the study, the effects of basalt fiber and fly ash additives on the strength and permeability properties of problematic soils has been investigated. For this purpose, basalt fiber length (6-24 mm), basalt fiber percentage (0-1.5%), curing time (1-56 days) and percentage of fly ash (0-15%) were selected as variables. Experimental studies have been carried out using the L₁₆ design table with 4 parameters and 4 levels specific to the Taguchi method. Unconfined compressive, splitting tensile and permeability tests were carried out on the samples prepared at optimum water content and maximum density values. As a result of statistical analysis, optimum parameters for unconfined compressive and splitting tensile tests; 18 mm basalt fiber length, 1% basalt fiber, 10% fly ash and 56 days curing time were obtained. The permeability coefficient increased with the increase in basalt fiber length and content. However, the permeability coefficient decreased with the increase in the percentage of fly ash.

Keywords: Basalt fiber, Fly ash, Soil stabilization, Strength

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde hızlı nüfus artışı, kentleşme ve sanayileşme, gelişmiş ülkelerdekine benzer şekilde Türkiye'de de yapı alanlarının hızla tükenmesine neden olmuştur. Buna bağlı olarak her geçen gün yeni yapılaşma alanlarının açılması zorunlu hale gelmiştir. İhtiyaçların artması ve kullanılabilir iyi temel zemini özelliği gösteren yerlerin azalması, problemlili zeminler üzerinde mühendislik yapılarının inşasını zorunlu hale getirmiştir. Problemlili zeminler genellikle yeterli taşıma kapasitesine sahip olmayıp, yüksek oturma ya da sıvılaşmaya müsait bir ortam oluşturabilirler. Bir inşaat projesinde bu tür zeminlerle karşılaşıldığında ilk seçenek zemini değiştirmek veya projenin yerini daha iyi mühendislik özelliklerine sahip zeminin olduğu bir yere taşımaktır. Ancak bu seçenekler çoğu zaman ekonomik değildir. Bu durumda en iyi seçenek zemin özelliklerinin yerinde stabilize edilmesidir. Bu amaçla, zemine çeşitli katkı maddeleri ekleyerek yapılan zemin stabilizasyon yöntemi günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarla, farklı zemin türlerine çimento, kireç, uçucu kül ve silis dumanı gibi farklı katkı maddeleri ilave edilerek zeminlerin dayanım durumları ve iyileşme performansları ölçülüp gözlemlenmektedir (Kenan, 2018; Geçkil ve diğ., 2019).

Uçucu kül elektrik enerjisi elde etmek için yakıt olarak öğütülmüş kömürün kullanıldığı termik santrallerde veya demir, çelik ve bazı metallerin üretimlerinde olduğu gibi elde edilmek istenen esas ürünün yanı sıra yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Atık olarak elde edilen bu ürünlerin depolanması, atılması büyük güçlükler yaratmakta ve çevre kirliliği dahil topluma büyük sorunlar getirmektedir. Yan ürünlerin değerlendirilmesi, çok kısıtlı olan doğal malzemelerin kullanımını azaltarak doğanın tahrip edilmesi ve doğal malzemelerin azalmasını önlemektedir. Atık malzemelerin değerlendirilmesi durumunda çevre sorunları azalmakta, enerji tasarrufu ve ekonomi sağlanmaktadır (Güler ve diğ., 2005; Alkaya, 2009). Türkiye'de bir yılda yaklaşık 45 milyon ton kömür yakılmakta ve ortalama 15 milyon ton uçucu kül ortaya çıkmaktadır. Ülkemiz için böyle bir atığın depolanmaması veya değerlendirilmemesi hem çevresel problemler açısından hem de ekonomik açıdan bu konuya yönelik çalışmaları zorunlu kılmaktadır (Demiröz, 1996). Uçucu kül, puzolanik özellikler ve dolayısıyla yüksek sıkıştırma mukavemeti veren yüksek kalsiyum ve silikat oksit içeriği nedeniyle daha önce zemini stabilize etmek için kullanılmıştır (Zha ve diğ., 2008; Bayshakhi ve diğ., 2017; Çimen ve Keleş, 2020; Dehghanian, 2021; Malikzade ve diğ., 2021)

Günümüzde zemin iyileştirmesinde kullanılan geleneksel katkı maddelerine (kireç, çimento vb.) alternatif olarak doğal ve yapay fiberlerin kullanıldığı çalışmaların sayısı sürekli artmaktadır. Stabilizasyon için bambu, şeker kamışı, Hindistan cevizi lifi gibi doğal fiberler ve polipropilen, polyester, polietilen, cam, naylon, çelik lif gibi yapay fiberler kullanılmaktadır (Danso ve diğ., 2015; Özdemir ve diğ., 2016; Ndepete, 2017; Ayothiraman ve Singh, 2017; Cao ve diğ., 2019; Nezhad ve diğ., 2021).

Yapay fiber türlerinden biri de bazalt fiberlerdir. Bazalt fiberler, 1300-1700 °C'de bazalt taşlarının eritilmesiyle elde edilir. Diğer yaygın olarak kullanılan fiber katkı türlerinden çok daha yüksek çekme mukavemeti ve korozyon direncine sahiptir. Bazalt fiber, 21. yüzyılda doğal yeşil ve çevre dostu bir mineral katkı olarak kabul edilmiştir (Zuhuang ve Yu, 2015; Wang ve diğ., 2020). Betonda yalıtım, ses emilimi, ısıya dayanıklı ve takviyeli malzemeler olarak yaygın olarak kullanılmaktadır (Ludovico ve diğ., 2010; Shi ve diğ., 2013). Konvansiyonel elyaflarla karşılaştırıldığında, bazalt elyafın fiyatı karbon elyafın 1/10'u kadardır. Ayrıca bazalt elyafın çekme mukavemeti ve elastisite modülü gibi mekanik özellikleri polipropilen elyafından önemli ölçüde yüksektir. Günümüzde, bazalt fiberlerin betonda katkı maddesi olarak kullanıldığı birçok çalışma olmasına rağmen, zemin stabilizasyonundaki çalışmalar daha azdır. Bazalt elyaf takviyesinin mekanizması için, içerik ve uzunluğun takviye etkisi üzerindeki etkisi net değildir, bu nedenle bazalt elyaf takviyeli killi zeminin mühendislik özelliklerini incelemek önemlidir (Gao ve diğ., 2015).

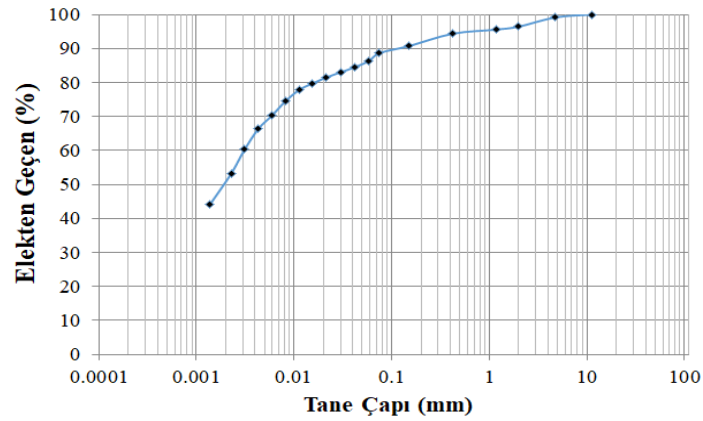
Bu çalışmada, bazalt fiber ve uçucu kül katkılarının problemlili zeminin serbest basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve permeabilite (geçirimsizlik) özelliklerine etkisi incelenmiştir. Puzolanik aktiviteyi arttırmak amacıyla tüm karışımlara %3 kireç katkısı yapılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Zemin Özellikleri (Soil Properties)

Deneylerde kullanılan killi zemin, Konya ili, Selçuklu ilçesi, 2. Organize Sanayi Bölgesinden temin edilmiştir. Zeminin indeks özelliklerini belirlemek amacıyla elek analizi, hidrometre analizi, kıvam limitleri ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır.

Elek analizi ASTM D1140-17 ve hidrometre deneyi ASTM D422-63 standardına uygun yapılarak granülometri eğrisi çizilmiştir (Şekil 1). Zemin içerisinde %0.86 çakıl, %10.50 kum, %38.21 silt ve %50.43 oranında kil bulunmaktadır. Zeminin fiziksel özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Zeminin tane dağılım eğrisi

Figure 1. Grain-size distribution curve of the soil

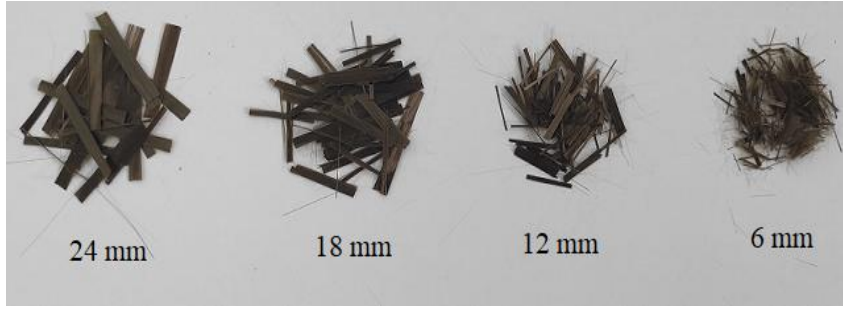
Çizelge 1. Zeminin fiziksel özellikleri

Table 1. Physical properties of the soil

Özgül Ağırlık	2.65
Likit Limit, ω_L (%)	104.4
Plastik Limit, ω_P (%)	30.6
Plastisite İndisi (I_P) (%)	73.8
Zemin Sınıfı (USCS)	CH
Optimum Su Muhtevası, ω_{opt} (%)	28.5
Maksimum Kuru Yoğunluk, ρ_{kmax} (g/cm ³)	1.45

Bazalt Fiber (Basalt Fiber)

Çalışmada kullanılan bazalt fiberler Spinteks Tekstil İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş (Denizli/Türkiye) şirketinden tedarik edilmiştir. Şekil 2’de farklı boydaki bazalt fiberlerin görüntüleri sunulmaktadır. Çizelge 2’de deneylerde kullanılan bazalt fiberlerin fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir.



Şekil 2. Deney kullanılan bazalt fiberler
Figure 2. Basalt fibers used in the experiments

Çizelge 2. Bazalt fiberin fiziksel ve mekanik özellikleri
Table 2. Physical and mechanical properties of basalt fiber

Bazalt Fiber	
Özellik	Değer
Özgül Ağırlık	2.60 - 2.65
Elastisite Modülü (GPa)	70 - 90
Çekme Dayanımı (MPa)	2800 - 3300
Kopma Uzaması (%)	3.1 - 6
Çapı (µm)	6 - 25
Erime Sıcaklığı (°C)	1350

Uçucu Kül (Fly Ash)

Çalışmada F tipi uçucu kül, Kütahya Seyitömer Termik Santralinden temin edilmiştir. Uçucu külün kimyasal bileşimi Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Uçucu külün kimyasal yapısı
Table 3. Chemical structure of fly ash

Kimyasal Bileşim	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Kızdırma Kaybı
Miktar (%)	54.49	20.58	9.27	4.26	4.48	0.52	2.01	0.65	3.01

Deney Tasarımı (Experiment Design)

Herhangi bir deneyin tasarlanması ile bu deneyi etkileyen parametrelerin sonuç üzerindeki etkilerini araştırmak için çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Taguchi yöntemi ile seçilen ortogonal bir dizin kullanılarak az sayıda deney veya çalışma yapılarak parametrelerin sonuca etkileri araştırılabilmektedir. Bu yöntem ile yapılmamış olan diğer deney sonuçları ile maksimum ve minimum değerler de tahmin edilebilmekte, deneysel maliyet minimum düzeyde tutulabilmektedir. Taguchi metodunda tasarımlar için özel olarak geliştirilmiş ortogonal dizin tabloları kullanılmaktadır. Bu çalışmada 4 parametrelili ve 4 seviyeli standart L₁₆ ortogonal dizin tablosu kullanılmıştır (Çizelge 4 ve 5). Puzolanik aktiviteyi arttırmak amacıyla tüm karışımlara %3 kireç katkısı yapılmıştır.

Çizelge 4. Taguchi tasarımı için L₁₆ ortogonal deney tablosuTable 4. L₁₆ Orthogonal experiment table for Taguchi design

Tasarım No	Parametreler ve Parametre Seviyeleri				Tasarım No	Parametreler ve Parametre Seviyeleri			
	A	B	C	D		A	B	C	D
1	1	1	1	1	9	3	1	3	4
2	1	2	2	2	10	3	2	4	3
3	1	3	3	3	11	3	3	1	2
4	1	4	4	4	12	3	4	2	1
5	2	1	2	3	13	4	1	4	2
6	2	2	1	4	14	4	2	3	1
7	2	3	4	1	15	4	3	2	4
8	2	4	3	2	16	4	4	1	3

Çizelge 5. Taguchi deney tasarımında kullanılan parametreler ve seviyeleri

Table 5. Parameters and levels used in Taguchi experimental design

Seviye	Parametreler			
	A	B	C	D
	Bazalt Fiber Uzunluğu (mm)	Bazalt Fiber (Ağırlıkça, %)	Kür Süresi (Gün)	Uçucu Kül (Ağırlıkça, %)
1	6	0	1	0
2	12	0.5	7	5
3	18	1	28	10
4	24	1.5	56	15

Numune Hazırlanması (Sample Preparation)

Çizelge 4'deki her tasarım için kompaksiyon deneyi (Standart Proktor) yapılarak optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluk değerleri belirlenmiştir. Deney numuneleri, tasarıma göre belirlenen miktarlarda alınarak optimum su muhtevası ve maksimum yoğunluk değerlerinde, 5 cm çapında ve 10 cm yüksekliğindeki PVC kalıplarda hacim kontrollü olarak 3 tabaka halinde sıkıştırılmıştır. PVC kalıplar deney numunelerinin hazırlanması amacı ile özel olarak tasarlanmıştır. Hazırlanan numuneler hava almayacak şekilde poşetlenmiştir. Daha sonra saklama kabı içerisinde yaklaşık 23°C sıcaklıkta güneş ışığı almayan bölmelerde deney tablosunda verilen sürelerde küre bırakılmıştır (Şekil 3). Kür süresi sonunda uygun başlıklı kriko ile kalıplardan çıkarılan numuneler üzerinde gerekli deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerde her tasarım için 3 adet numune hazırlanmıştır.



Şekil 3. Numune hazırlama süreci
Figure 3. Sample preparation process

BULGULAR (RESULTS)

Kompaksiyon (Standart Proctor) Deney Sonuçları (Compaction (Standard Proctor) Test Results)

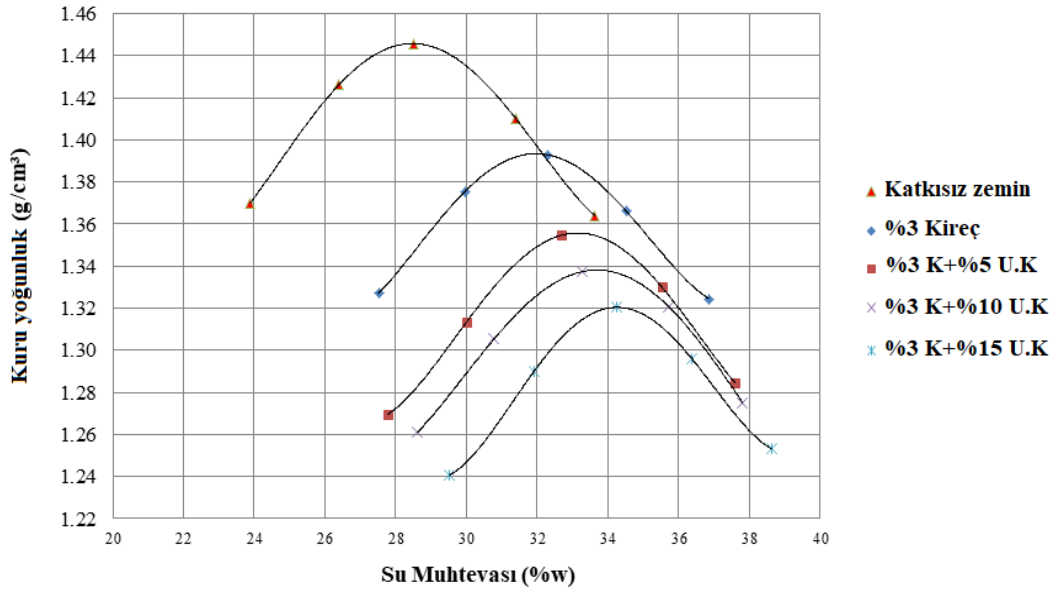
DeneySEL çalışmaların yürütülebilmesi için öncelikle Taguchi deney tablosunda verilen her tasarım için ASTM D698-12e2 standardına göre kompaksiyon deneyi yapılmıştır. Bazalt fiber (B.F) ve uçucu kül (U.K) katkılı tasarımlar (ayrıca %3 kireç katkısı) için elde edilen optimum su içeriği (w_{opt}) ve maksimum kuru yoğunluk (ρ_{kmax}) değerleri Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Kompaksiyon deney sonuçları*Table 6. Compaction test results*

Tasarım No	B.F Uzunluğu (mm)	B.F Yüzdesi (%)	Kür Süresi (gün)	U.K Yüzdesi (%)	$Q_{k,max}$ (g/cm ³)	W_{opt} (%)
1	6	0	1	0	1.394	32.0
2	6	0.5	7	5	1.349	33.0
3	6	1	28	10	1.340	33.5
4	6	1.5	56	15	1.314	34.4
5	12	0	7	10	1.338	33.7
6	12	0.5	1	15	1.311	34.3
7	12	1	56	0	1.386	31.9
8	12	1.5	28	5	1.356	33.1
9	18	0	28	15	1.320	34.3
10	18	0.5	56	10	1.332	33.4
11	18	1	1	5	1.350	33.0
12	18	1.5	7	0	1.379	31.8
13	24	0	56	5	1.356	33.2
14	24	0.5	28	0	1.384	31.9
15	24	1	7	15	1.311	34.4
16	24	1.5	1	10	1.327	33.6

Kireç ve uçucu kül ilavesiyle birlikte optimum su içeriği değeri artarken maksimum kuru yoğunluk değeri azalmaktadır. Bazalt fiber içeriğinin kompaksiyon parametrelerine önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür (Çizelge 6). Katkısız zemin ile kireç ve uçucu kül katkılı numunelerin kompaksiyon eğrileri Şekil 4'te verilmiştir.

Kompaksiyon eğrileri incelendiğinde, %3 kireç ilavesiyle optimum su muhtevası %28.4'ten %32'ye çıkmıştır. Maksimum kuru yoğunluk değeri ise 1.45 g/cm³'ten 1.39 g/cm³'e düşmüştür. Ayrıca kireç oranı %3 olarak sabit tutulduğunda uçucu kül miktarının artmasıyla optimum su muhtevası artarken, maksimum kuru yoğunluk değerinin düştüğü görülmüştür.



Şekil 4. Kompaksiyon eğrileri
Figure 4. Compaction curves

Serbest Basınç Deney Sonuçları (Unconfined compressive Test Results)

Deney programında yer alan 16 farklı tasarım ve katkısız zemin için ASTM D2166 standardına göre Serbest basınç deneyi yapılmıştır (Şekil 5). Yapılan deneylerden elde edilen serbest basınç mukavemeti (SBM) ve birim deformasyon (ϵ) değerleri Çizelge 7'de verilmiştir.



Şekil 5. Serbest basınç deney numuneleri
Figure 5. Unconfined compressive test samples

Çizelge 7 incelendiğinde en büyük dayanım 10 numaralı tasarımda elde edilmiştir. Bu tasarımda bulunan değer, katkısız zeminin serbest basınç mukavemetinin 8.69 katıdır. Birim deformasyon değerleri (ϵ) incelendiğinde 1 günlük kür süresine sahip numunelerde puzolanik aktivitelerin tamamen gerçekleşmemesi nedeniyle daha sünek davrandığı gözlenmiştir. Ayrıca, birim deformasyon değerlerine bakıldığında bazalt fiber içeriği arttıkça süneklilik artmıştır.

İstatistiksel analiz sonuçları Minitab 19 Statistical Software yazılımı ile değerlendirilmiştir. Taguchi analizi yapılarak sonuçlar üzerinde etkili olan parametrelerin optimum seviyelerini belirlemek için S/N oranları belirlenmiştir. Daha sonra parametrelerin sonuç üzerindeki etki derecelerini belirlemek amacıyla çok parametrelili varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Sonuçlar değerlendirilirken tüm parametreler arasında etkileşim olduğu kabul edilmiştir.

Çizelge 7. Serbest basınç deney sonuçları

Table 7. Unconfined compressive test results

Deney No	q_u (kPa)	ϵ (%)
Katkısız	155.8	5.04
1	296.7	3.24
2	813.7	2.44
3	1205.1	2.71
4	1194.0	2.71
5	1005.7	2.36
6	529.7	3.98
7	961.3	2.64
8	1064.4	2.74
9	1119.7	2.41
10	1354.0	2.53
11	513.8	3.97
12	761.6	2.69
13	819.8	2.21
14	847.3	2.53
15	1179.8	2.85
16	531.1	4.31

S/N analizi yapılırken 'en yüksek en iyi' durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Serbest basınç mukavemeti için yapılan analizlere göre S/N oranlarının ana etki grafiği Şekil 6'da verilmiştir. Buna göre, serbest basınç mukavemeti bazalt fiber uzunluğu 18 mm, bazalt fiber içeriği %1 ve uçucu kül içeriği %10'a kadar artmakta bundan sonra ise azalmaya başlamaktadır. Kür süresi arttıkça serbest basınç mukavemeti artmaktadır.

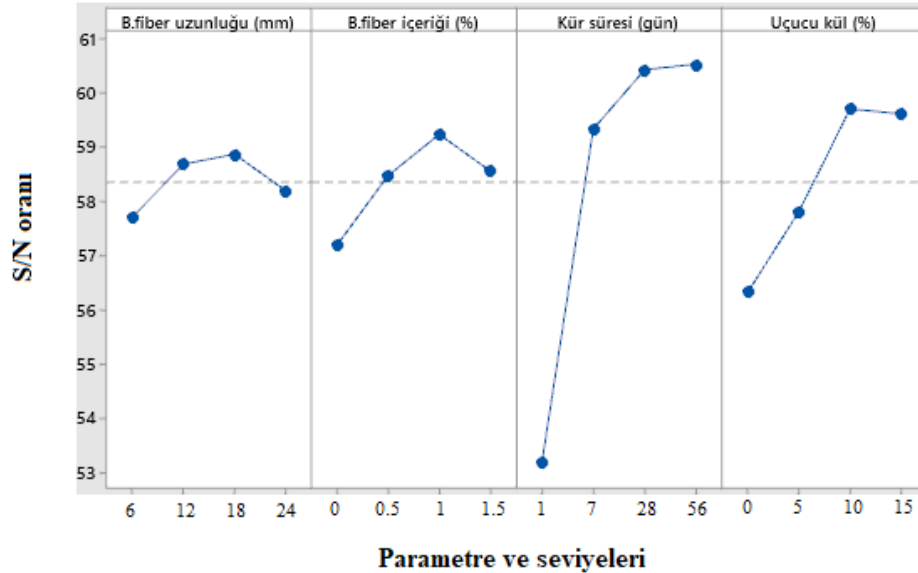
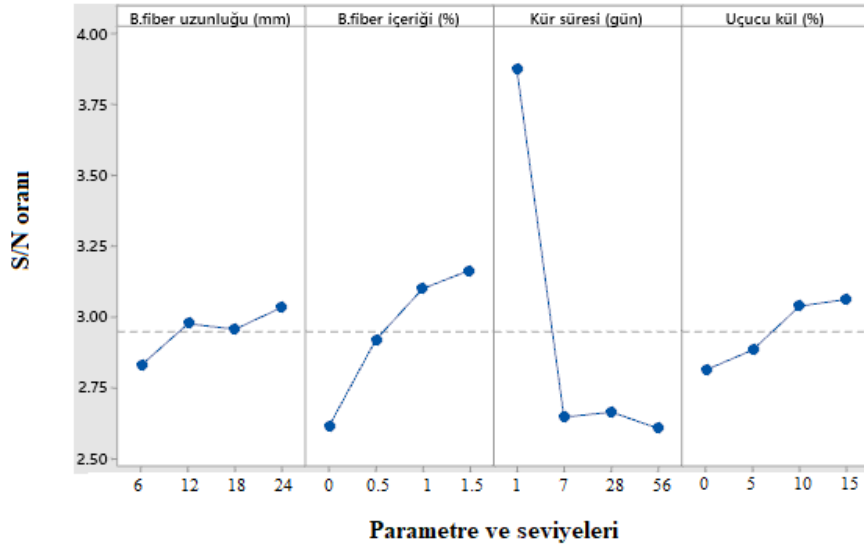
**Şekil 6.** Serbest basınç mukavemeti S/N grafiği

Figure 6. Unconfined compressive strength S/N graph

Birim deformasyon değerleri için yapılan analizlere göre S/N oranlarının ana etki grafiği Şekil 7'de verilmiştir. Buna göre; bazalt fiber uzunluğu, bazalt fiber içeriği ve uçucu kül içeriği arttıkça süneklilik artmaktadır. 1 günlük kür süresine sahip numuneler daha yüksek birim deformasyon değerlerine sahiptir.



Şekil 7. Birim deformasyon değerleri S/N grafiği

Figure 7. Unit deformation values S/N graph

Varyans analizi yapılırken serbest basınç mukavemeti ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare değeri %99.57, R-kare (düzeltilmiş) değeri %97.86 ve R-kare (tahmini) değeri %87.81 olarak belirlenmiştir. Serbest basınç mukavemet değerleri için geliştirilen bu modelde $p=0.003 < 0.05$ olup model anlamlıdır (Çizelge 8). Serbest basınç mukavemeti üzerinde en etkili parametre kür süresi, daha sonra uçucu kül ve bazalt fiber içeriğidir. Bazalt fiber uzunluğu için P değeri 0.05'ten büyük olduğu için bu parametrenin deney sonucu üzerinde anlamlı bir etkisi yoktur.

Çizelge 8. Serbest basınç mukavemeti için varyans analizi sonuçları (ANOVA)

Table 8. Analysis of variance results for unconfined compressive strength (ANOVA)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	12	190.948	190.948	15.9124	58.06	0.003
B.Fiber Uzunluğu	3	3.272	3.272	1.0906	3.98	0.143
B.Fiber Yüzdesi	3	8.739	8.739	2.9129	10.63	0.042
Kür Süresi	3	147.710	147.710	49.2367	179.66	0.001
Uçucu Kül	3	31.228	31.228	10.4093	37.98	0.007
Hata	3	0.822	0.822	0.2741		
Toplam	15	191.771				

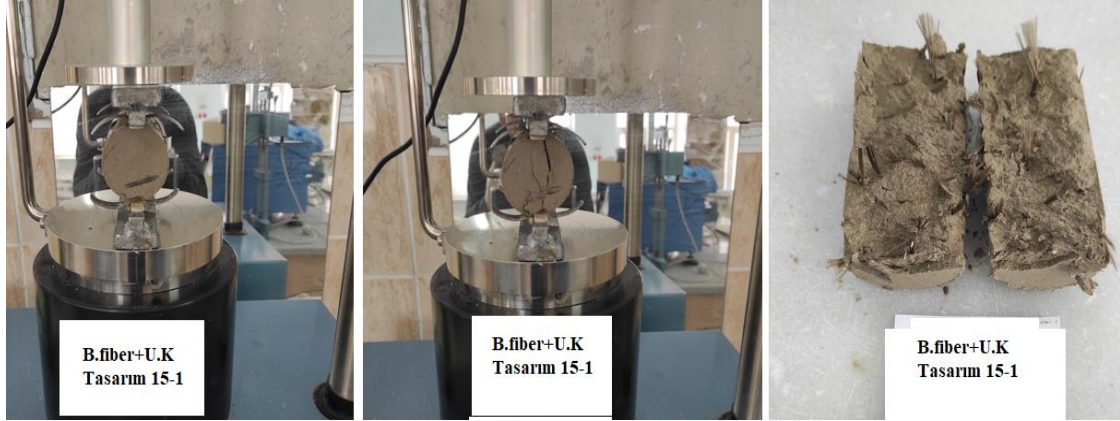
Birim deformasyon (ϵ) değerleri için geliştirilen modelde $p < 0.05$ olup model %99 güven aralığı içerisindedir (Çizelge 9). ϵ değerleri üzerinde etkili olan parametreler sırasıyla kür süresi, bazalt fiber içeriği, uçucu kül içeriği ve bazalt fiber uzunluğudur.

Çizelge 9. Serbest basınç deneyi ϵ değerleri için varyans analizi sonuçları (ANOVA)*Table 9. Analysis of variance results for unconfined compressive test ϵ values (ANOVA)*

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	12	40.7093	40.7093	3.39240	288.68	0.000
B.Fiber Uzunluğu	3	0.33710	0.33710	0.11240	9.56	0.048
B.Fiber İçeriği	3	6.18190	6.18190	2.06060	175.35	0.001
Kür Süresi	3	33.0179	33.0179	11.0060	936.55	0.000
Uçucu Kül	3	1.17240	1.17240	0.39080	33.25	0.008
Hata	3	0.03530	0.03530	0.01180		
Toplam	15	40.7446				

Yarmada Çekme Deney Sonuçları (Splitting Tensile Test Results)

Deney programında yer alan 16 farklı tasarım ve katkısız zemin için ASTM C496 standardına göre yarmada çekme deneyi yapılmış (Şekil 8), yarmada çekme mukavemeti (σ_t) ve birim deformasyon (ϵ) değerleri Çizelge 10'da verilmiştir.

**Şekil 8.** Yarmada çekme deney numunesi*Figure 8. Splitting tensile test sample*

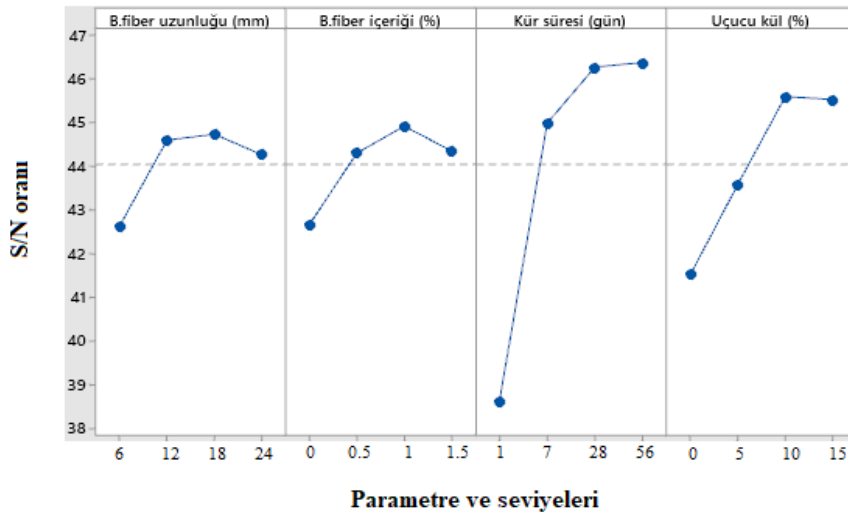
Çizelge 10 incelendiğinde en büyük yarmada çekme mukavemeti 10 numaralı tasarımda elde edilmiştir. Bu tasarımda bulunan yarmada çekme mukavemeti katkısız zeminin yarmada çekme mukavemetinin 8.15 katıdır.

Çizelge 10. Yarmada çekme deney sonuçları

Table 10. Splitting tensile test results

Deney No	σ_t (kPa)	ϵ (%)
Katkısız	33.7	2.94
1	45.71	1.94
2	146.69	2.25
3	219.67	2.46
4	227.21	2.52
5	201.46	2.12
6	105.32	2.22
7	182.73	2.59
8	213.22	2.73
9	224.29	2.04
10	274.65	2.23
11	100.96	2.61
12	141.42	2.87
13	164.22	1.91
14	169.73	2.48
15	236.33	2.78
16	107.58	3.01

S/N analizi yapılırken 'en yüksek en iyi' durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Yarmada çekme mukavemeti için yapılan analizlere göre S/N oranlarının ana etki grafiği Şekil 9'da verilmiştir. Buna göre, yarmada çekme mukavemeti bazalt fiber uzunluğu 18 mm, bazalt fiber içeriği %1 ve uçucu kül içeriği %10'a kadar artmakta bundan sonra ise azalmakta, kür süresi arttıkça yarmada çekme mukavemeti arttığı gözlenmiştir. Birim deformasyon (ϵ) değerleri incelendiğinde bazalt fiber içeriğinin yüksek olduğu tasarımlarda numunelerin daha sünek bir davranış gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 9. Yarmada çekme mukavemeti S/N grafiği

Figure 9. Splitting tensile strength S/N graph

Varyans analizi yapılırken yarmada çekme mukavemeti ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare değeri %99.41, R-kare (düzeltilmiş) değeri %97.07 ve R-kare (tahmini) değeri %83.35 olarak belirlenmiştir. Yarmada çekme mukavemet değerleri için geliştirilen bu modelde $p=0.005 < 0.05$ olup model anlamlıdır (Çizelge 11). Yarmada çekme mukavemeti üzerinde en etkili parametre kür süresi, daha sonra uçucu kül içeriği, bazalt fiber içeriği ve bazalt fiber uzunluğudur.

Çizelge 11. Yarmada çekme mukavemeti için varyans analizi sonuçları (ANOVA)*Table 11. Analysis of variance results for splitting tensile strength (ANOVA)*

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	12	230.677	230.677	19.2231	42.45	0.005
B.fiber uzunluğu	3	11.262	11.262	3.7541	8.29	0.058
B.fiber yüzdesi	3	11.304	11.304	3.7679	8.32	0.058
Kür süresi	3	163.415	163.415	54.4716	120.28	0.001
Uçucu kül	3	44.696	44.696	14.8987	32.90	0.009
Hata	3	1.359	1.359	0.4529		
Toplam	15	232.036				

ϵ değerleri için geliştirilen modelde $p < 0.022$ olup model %98.42 güven aralığı içerisindedir (Çizelge 12). ϵ değerleri üzerinde en çok etkisi olan parametre bazalt fiber içeriğidir. Bazalt fiber içeriği arttıkça numunelerin sünekliliği artmıştır

Çizelge 12. Yarmada çekme deneyi ϵ değerleri için varyans analizi sonuçları (ANOVA)*Table 12. Analysis of variance results for splitting tensile test ϵ values (ANOVA)*

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	12	21.8236	21.8236	1.8186	15.62	0.022
B.Fiber Uzunluğu	3	1.3881	1.3881	0.4627	3.97	0.143
B.Fiber İçeriği	3	19.1648	19.1648	6.3883	54.87	0.004
Kür Süresi	3	0.9460	0.9460	0.3153	2.71	0.217
Uçucu Kül	3	0.3247	0.3247	0.1082	0.93	0.523
Hata	3	0.3493	0.3493	0.1164		
Toplam	15	22.1729				

Permeabilite Deney Sonuçları (Permeability Test Results)

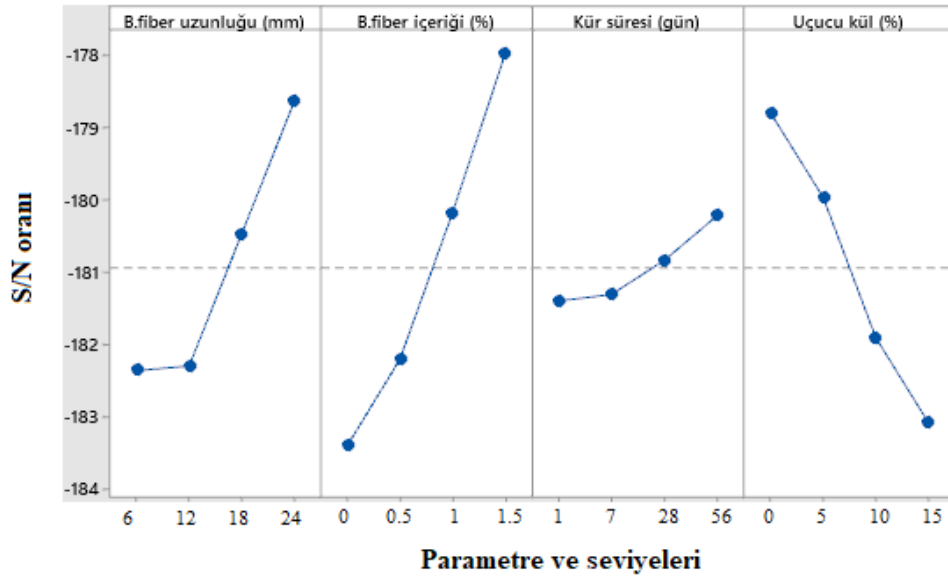
16 farklı tasarım ve katkısız zemin için ASTM D5084 standardına göre düşen seviyeli permeabilite deneyi yapılmıştır. Permeabilite deney sonuçları Çizelge 13'te verilmiştir.

Çizelge 13. Permeabilite deney sonuçları

Table 13. Permeability test results

Deney No	k (m/s)
Katkısız	2.06E-10
1	7.24E-10
2	7.03E-10
3	7.28E-10
4	9.11E-10
5	4.95E-10
6	4.75E-10
7	1.16E-09
8	1.27E-09
9	5.62E-10
10	8.28E-10
11	1.10E-09
12	1.58E-09
13	1.04E-09
14	1.31E-09
15	9.94E-10
16	1.39E-09

Permeabilite deney sonuçları için S/N analizi yapılırken 'en yüksek en iyi' durumuna göre optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Yapılan analizlere göre S/N oranlarının ana etki grafiği Şekil 8'de verilmiştir. Buna göre; bazalt fiber uzunluğu, bazalt fiber içeriği ve kür süresi arttıkça permeabilite katsayısı artarken, uçucu kül içeriğinin artması ile permeabilite katsayısı azalmıştır.



Şekil 10. Permeabilite deneyi S/N grafiği

Figure 10. Permeability test S/N graph

Varyans analizlerinde permeabilite katsayısı ve tasarım parametreleri arasında oluşturulan modele göre, R-kare değeri %99.48, R-kare (düzeltilmiş) değeri %97.41 ve R-kare (tahmini) değeri %85.28 olarak belirlenmiştir. Permeabilite katsayısı değerleri için geliştirilen bu modelde $p=0.004 < 0.05$ olup model anlamlıdır (Çizelge 14). Permeabilite katsayısı üzerinde en etkili parametre bazalt fiber içeriği, daha sonra uçucu kül içeriği ve bazalt fiber uzunluğudur. Kür süresi az da olsa permeabilite katsayısını etkilemektedir.

Çizelge 14. Permeabilite katsayıları için varyans analizi sonuçları (ANOVA)*Table 14. Analysis of variance results for permeability coefficients (ANOVA)*

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri
Model	12	154.188	154.188	12.8490	48.04	0.004
B.Fiber Uzunluğu	3	37.8010	37.801	12.6004	47.11	0.005
B.Fiber Yüzdesi	3	68.3760	68.376	22.7919	85.22	0.002
Kür Süresi	3	3.55300	3.5530	1.1844	4.43	0.127
Uçucu Kül	3	44.4580	44.458	14.8193	55.41	0.004
Hata	3	0.80200	0.8020	0.2674		
Toplam	15	154.990				

Deneysel çalışmalar sonunda elde edilen bulgular literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırıldığında, kullanılan katkı maddelerinin zemin özellikleri üzerindeki etkisinin benzer olduğu belirlenmiştir (Wang ve diğ., 2016; Zorluer ve Gücek, 2017; Bilici ve diğ., 2020; Çimen ve Keleş, 2020; Ghasem ve diğ., 2022).

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, bazalt fiber ve uçucu kül ile güçlendirilmiş problemlili kil zeminin mühendislik özelliklerini değerlendirmek amacıyla deneysel ve istatistiksel bir çalışma yürütülmüştür. Bu amaçla bazalt fiber uzunluğu, bazalt fiber yüzdesi, kür süresi ve uçucu kül yüzdesinin değişken olduğu 4 parametrelili ve 4 seviyeli Taguchi ortogonal dizin tablosu kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Puzolanik aktiviteyi arttırmak amacıyla her tasarıma %3 kireç ilavesi yapılmıştır. Çalışmada varılan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Kireç ve uçucu kül ilavesiyle birlikte optimum su içeriği (w_{opt}) değeri artarken maksimum kuru yoğunluk (ρ_{kmax}) değerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca, bazalt fiber içeriğinin kompaksiyon parametrelerine önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

Bazalt fiber ve uçucu kül katkısı ile problemlili zeminin serbest basınç ve yarmada çekme mukavemetinde büyük oranda artış gözlenmiştir. En yüksek dayanımların elde edildiği tasarımda katkısız zeminin serbest basınç mukavemeti %769, yarmada çekme mukavemeti %751 artmıştır.

Serbest basınç ve yarmada çekme mukavemeti; bazalt fiber uzunluğu 18 mm, bazalt fiber içeriği %1 ve uçucu kül içeriği %10'a kadar artmakta bundan sonra ise azalmaya başlamaktadır. Kür süresi arttıkça serbest basınç ve yarmada çekme mukavemeti artmaktadır. Her iki deney için optimum parametreler; 18 mm bazalt fiber uzunluğu, %1 bazalt fiber, %10 uçucu kül ve 56 gün küresi olarak elde edilmiştir.

Bazalt fiber uzunluğunun serbest basınç mukavemeti üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

Serbest basınç ve yarmada çekme deneylerinde, bazalt fiber uzunluğu ve içeriği arttıkça sünekliğin arttığı belirlenmiştir. Özellikle yarmada çekme deneyinde, birim deformasyon üzerinde en etkili parametrenin bazalt fiber içeriği olduğu görülmüştür.

Permeabilite deneyinde; bazalt fiber uzunluğu ve içeriği arttıkça permeabilite katsayısının arttığı belirlenmiştir. Uçucu kül içeriğinin artması ise permeabilite katsayısını düşürmüştür. Kür süresinin permeabilite katsayısına önemli bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Alkaya, D., 2009, "Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmesinde Kullanılmasının İncelenmesi", *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Vol. 5, No. 1, 61-72.
- Ayothiraman, R., Singh, A., "Improvement of Soil Properties by Basalt Fibre Reinforcement", *IDFI-PFSF 2017 Conference*, Melbourne, 404-412, 2017.

- Bilici, H., Okur, D. V., Türköz, M., Savaş, H., 2020, "Kil Zeminin Dayanımı Üzerinde Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılarının Etkisi ve Karşılaştırmalı Analizi", *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Vol. 9, No. 2, 910-919.
- Cao, Z., Ma, Q., Wang, H., 2019, "Effect of Basalt Fiber Addition on Static-Dynamic Mechanical Behaviors and Microstructure of Stabilized Soil Compositing Cement and Fly Ash", *Advances in Civil Engineering*, Vol. 2019, 1-20.
- Çimen, Ö., Keleş, E., 2020, "Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Mühendislik Özelliklerine Uçucu Kül ve Kireç Katkılarının Etkisi", *İleri Mühendislik Çalışmaları ve Teknolojileri Dergisi*, Vol. 5, No. 2, 80-90.
- Danso, H., Martinson, D. B., Ali, M., Williams, J., 2015, "Effect of Fibre Aspect Ratio on Mechanical Properties of Soil Building Blocks", *Construction and Building Materials*, Vol. 83, 314-319.
- Demiröz, A., 1996, *Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmesinde Kullanımı*, Yüksek Lisans Semineri, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Dehghanian, K., 2021, "Killi Zeminlerin Özelliklerinin Uçucu Kül Kullanarak İyileştirilmesi", *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, Vol. 3, No. 1, 66-72.
- 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*, 1-8.
- Geçkil, T., Sarıcı, T., Yıldırım, E. S., 2019, "Kireç Katkısı ile Kil Bir Zeminin Dayanımının İyileştirilmesi", *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Vol. 34, No. 4, 171-180.
- Ghasem G. P., Momeni, M., Mousivand, M., Bayat, M., 2022, "Unconfined Compressive Strength Characteristics of Treated Peat Soil with Cement and Basalt Fibre", *International Journal of Engineering*, Vol. 35, No. 5, 1089-1095.
- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., Mordoğan, H., "Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları", *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, IMCET 2005, İzmir, 419-423, 09-12 Haziran 2005.
- Kenan, A., 2018, *Bazalt Fiber Katkısının Siltli Zeminlerin Kayma Direnci Parametrelerine Etkisi*, Yüksek Lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Ludovico, M.D., Prota, A., Manfredi, G., 2010, "Structural Upgrade Using Basalt Fibers for Concrete Confinement", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 14, No. 5, 541-552.
- Malikzada, A., Pulat, H. F., Develioğlu, İ., "Effect of Fly Ash on Compaction Behavior of Alluvial Soil", *5th International Students Science Congress Proceedings Book*, İzmir, 126-135, 21-22 May 2021.
- Nath, B. D., Molla, M., Ali, K., Sarkar, G., 2017, "Study on Strength Behavior of Organic Soil Stabilized with Fly Ash", *International Scholarly Research Notices*, Vol. 2017, 1-6.
- Ndepete, C. P., 2017, *Bazalt Fiber Katkısının Siltli Zeminlerde Kayma Direncine Etkisi*, Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Nezhad, M. G., Tabarsa, A., Latifi, N., 2021, "Effect of Natural and Synthetic Fibers Reinforcement on California Bearing Ratio and Tensile Strength of Clay", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 13, No. 3, 626-642.
- Özdemir, T., Polat, G. E., Azdeniz, O., Boz, A., Sezer, A., "Bazalt Fiber ve Kireç ile Güçlendirilmiş Kil Zeminin Dayanım Özellikleri", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi*, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, 1025-1034, 2016.
- Shi, J., Zhu, H., Wu, Z., Seracino, R., Wu, G., 2013, "Bond Behavior between Basalt Fiber-Reinforced Polymer Sheet and Concrete Substrate under The Coupled Effects of Freeze-Thaw Cycling and Sustained Load", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 17, No. 4, 530-542.
- Zha, F., Liu, S., Du, Y., Cui, K., 2008, "Behavior of Expansive Soils Stabilized with Fly Ash", *Natural Hazards*, Vol. 47, No. 3, 509-523.
- Zhuang, X. S., Yu, X. Y., 2015, "Experimental Study on Strength Characteristics of Lime-Basalt Fiber Reinforced Expansive Soil", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 744, 495-498.
- Zorluer, İ., Gücek, S., 2017, "Usage of Fly Ash and Waste Slime Boron for Soil Stabilization", *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, Vol. 5, No. 1, 51-54.

- Wang, S., Chen, F., Xue, Q., Zhang, P., 2020, "Splitting Tensile Strength of Cement Soil Reinforced with Basalt Fibers", *Materials*, Vol. 13, No. 14, 3110.
- Wang, Y., Sun, S., Ye, W., Li, F., Ding, H., "Laboratory Test of Expansive Soil Improved by Lime-Basalt Fiber Reinforcement", *American Society of Civil Engineers Transportation Research Congress*, Beijing, China, 120-126, 6-8 June 2016.