

Killi Kum Zeminlerin Dayanımı Üzerinde Yüksek Fırın Cürufunun Etkileri

Tacetin GEÇKİL¹, Talha SARICI^{2*}, Özge Nur ÇETKİN³

^{1,2,3}Inönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 44280, Malatya

¹<https://orcid.org/0000-0001-8070-6836>

²<https://orcid.org/0000-0001-8488-5851>

³<https://orcid.org/0000-0002-0515-0337>

*Sorumlu yazar: talha.sarici@inonu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 28.07.2022

Kabul tarihi: 06.11.2022

Online Yayınlanma: 05.07.2023

Anahtar Kelimeler:

Killi kum zemin

Yüksek fırın cürufu

Zemin stabilizasyonu

Serbest basınç dayanımı

Kaliforniya taşıma gücü oranı

ÖZ

Bu çalışmada, killi kum bir zeminin dayanımı üzerinde endüstriyel bir atık ürün olan yüksek fırın cürufunun (YFC) etkileri araştırılmıştır. Bu sebeple, kullanılacak zemin, öncelikle çeşitli laboratuvar deneylerine tabi tutularak geoteknik özellikleri tespit edilmiştir. Ardından, ağırlıkça %5 ile %30 aralığında değişen oranlarda YFC zemine katılarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Hem katkısız (saf) hem de stabilize zemin numunelerine standart Proktor deneyi uygulanarak numunelerin optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları tayin edilmiştir. Bu su içeriklerinde hazırlanmış olan saf ve stabilize zemin numuneleri 1, 7 ve 28 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra serbest basınç dayanımı ve Kaliforniya taşıma gücü oranı (CBR) deneylerine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları dikkate alındığında, en efektif katkı oranı, 7 ve 28 günlük kür süresi sonunda %10 YFC katkılı numunelerden elde edilmiştir. Bu katkı oranında, 28 gün kür edilmiş numunelerin serbest basınç dayanımı ve CBR değerleri, saf zemine göre sırasıyla 1,26 ve 2,06 kat artış göstermiştir. Bu sonuçlara göre, killi kum zeminlerin taşıma gücü üzerinde %10 YFC katkısının önemli bir iyileştirici etkiye sahip olduğu öngörülmüştür.

Effects of Blast Furnace Slag on the Strength of Clayey Sand Soils

Research Article

Article History:

Received: 28.07.2022

Accepted: 06.11.2022

Published online: 05.07.2023

Keywords:

Clayey sand soil

Blast furnace slag

Soil stabilization

Unconfined compression test

California bearing ratio

ABSTRACT

In this study, the effects of blast furnace slag (BFS), an industrial waste product, on the strength of a clayey sand soil were investigated. For this purpose, firstly, various laboratory tests were carried out to determine the geotechnical properties of the soil. Then, test samples were prepared by adding BFS to the soil in varying proportions of 5% to 30% by the dry weight of the soil. Later, the optimum water contents and the maximum dry unit weights were determined by standard Proctor test to unstabilized and stabilized soil samples. After that, unstabilized and stabilized soil samples prepared at optimum water contents were subjected to unconfined compressive tests and California bearing ratio (CBR) tests after completing their 1, 7 and 28-days curing periods. As a result of the tests, the most effective additive ratio was obtained in the 10% BFS added samples after 7 and 28 days of curing. With this additive ratio, the unconfined compressive strength and CBR values of the samples cured for 28 days increased by 1.26 and 2.06 times, respectively, compared to the untreated soil. According to the results, it was predicted that 10% BFS additive has a significant improving effect on the bearing capacity of clayey sand soils.

To Cite: Geçkil T., Sarıcı T., Çetkin ÖN. Killi Kum Zeminlerin Dayanımı Üzerinde Yüksek Fırın Cürufunun Etkileri. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 6(2): 1159-1174.

1. Giriş

Zeminler, farklı özelliklere sahip olmaları nedeniyle yapı malzemesi veya yapı temeli olarak kullanıldıklarında her zaman arzu edilen mühendislik şartlarını sağlayamayabilirler. İstenilen mühendislik şartlarını sağlayamayan zeminlerin kullanılması, beraberinde birçok mühendislik problemlerini de getirmektedir. Bu sebeple, taşıma gücü ve oturma gibi sorunları gidermek, üzerine inşa edilecek yapının daha güvenli olmasını sağlamak vb. için zeminler stabilize edilerek güçlendirilmeye çalışılmaktadır. Her türlü zeminin fiziksel ve kimyasal özellikleri tespit edilerek olumsuz özelliklerinin iyileştirilmesi, üzerine inşa edilecek yapıyı kullanan canlılar açısından büyük önem arz etmektedir. Bu amaçla çeşitli fiziksel ve kimyasal stabilizasyon yöntemleri ile zeminler iyileştirilmeye çalışılmaktadır (Çetin, 2011; Geçkil ve ark., 2019).

Zemin stabilizasyonunda kullanılan geleneksel yöntemlerin maliyetli oluşu, zayıf zeminlerin ıslahında alternatif yöntemlerin ortaya çıkışına sebep olmaktadır (Çetin, 2011). Bu bağlamda stabilizasyon işlemini gerçekleştirmek amacıyla uygulamada kullanılan ve daha çok tercih edilen yöntem, çeşitli katkı maddelerinin zemine ilave edilerek zemin dayanımını artırmaya çalışmaktır. Özellikle taşıma gücü zayıf olan killi zeminlerin kayma dayanımları düşük, geçirgenlik, şişme ve sıvılaşma potansiyelleri yüksek olduğundan, bu zeminler çeşitli katkı maddeleri ile stabilize edilerek güçlendirilmeye çalışılmaktadır (Geçkil ve ark., 2020).

Zemin stabilizasyonunda katkı malzemesi olarak, üretimi sürekli ve yüksek tonajlı geri dönüşüm malzemeleri tercih edilmektedir. Stabilizasyonda, atık malzemeler kullanılarak olumlu sonuçlar elde edildiğinde bu malzemeler atık durumundan katma değerli ürün durumuna geçebilmektedirler (Bilgen ve ark., 2012). Bu kapsamda yüksek fırın cürufu (YFC), uçucu kül (UK), kazan altı külü (KAK) ve silis dumanı (SD) vb. gibi atıklar genellikle tercih edilen katkı malzemeleridir. Bu katkı maddeleri kullanılarak yapılan çalışmalarda dayanım, geçirgenlik ve sıkışabilirlik gibi zemin özelliklerinde iyileşmeler olduğu belirlenmiştir. Kullanılan bu katkı maddelerinin kolay temin edilebilmesi ve maliyetlerinin düşük olması tercih edilme sebepleri arasındadır (Bilgen ve ark., 2010; Çetin, 2011; Bilgen ve ark., 2012; Geçkil ve ark., 2020). Atık ürünlerin açığa çıkması ve depolanması insan sağlığı ve çevre açısından büyük sorunlara yol açmaktadır. Bu sorunları bertaraf etmek ve sınırlı olan doğal malzemelerin kullanımını azaltmak amacıyla birçok alanda çalışmalar yapılmaktadır. Dünya'daki doğal kaynakların sınırlı oluşundan dolayı enerji tüketiminin ve kaynak kullanımının azaltılması tüm sektörlerde olduğu gibi inşaat sektöründe de büyük önem arz etmektedir. Bu yüzden, atık maddeler zemin stabilizasyonunda iyileştirici alternatif bir ürün olarak değerlendirilmeye çalışılmaktadır (Bilgen ve ark., 2012). Bu çalışma kapsamında ise, endüstriyel bir atık ürün olarak ortaya çıkan YFC ile dayanımı düşük killi kum bir zemin stabilize edilerek dayanımının artırılması amaçlanmıştır. Demir-çelik üretim sürecinde endüstriyel bir yan ürün olarak açığa çıkan YFC, zemin stabilizasyonu ile beton ve yol inşaatlarında bir dolgu malzemesi olarak çeşitli mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir. YFC bileşeninin %95 kadarı kalsiyum, silika, alüminyum ve oksijen gibi çeşitli elementlerden meydana gelmektedir. Yapılan çalışmalarda, bu özellikleri bünyesinde barındıran

YFC'nin zayıf zeminlerin dayanımının artırılması maksadıyla kullanılmasının ülke ekonomilerine ve çevreye katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir (Tokyay ve Erdoğan, 2002; Öner ve Yıldırım, 2005; Bilgen ve ark., 2010; Geçkil ve ark., 2020).

Lakkimsetti ve Nayak (2022), yaptıkları çalışmada granüle YFC katkılı kilin kayma mukavemeti parametrelerini, mikro yapısını ve taşıma gücünü belirlemişlerdir. Zemine, zeminin kuru ağırlığının %10 ile %45 arasında değişen oranlarda YFC ikame ederek deney numuneleri hazırlamışlar ve bu deney numuneleri üzerinde 0, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Bu deneyler sonucunda en optimum katkı oranının %20 olduğunu ve serbest basınç dayanımının bu katkı oranında %287.9 arttığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte kür süresinin serbest basınç dayanımını artırdığını ve önemli bir etken olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, stabilize edilmemiş ve stabilize edilmiş zeminler üzerindeki şerit temellerin davranışını Plaxis paket programı kullanarak analiz etmişlerdir. Bu analizler sonucunda, kilin YFC ile stabilizasyonu ile taşıma gücünde önemli bir artış gösterdiğini belirlemişlerdir. Büyük miktarlarda YFC'nin doğada biriktirilmesinin çevre üzerinde ciddi olumsuzluk yaratabileceğini bu yüzden deneysel çalışmalarındaki gibi yüksek puzolanik aktiviteye sahip YFC'nin zeminlerin stabilizasyonu için kullanılmasının sürdürülebilir ve çevre dostu bir çözüm olacağını vurgulamışlardır. Safi ve Singh (2022), çalışmalarında hem ekonomik olan hem de killi zeminin mühendislik özelliklerini güçlendirmeye uygun birçok katkı maddesinin mevcut olduğunu belirtmişlerdir. Bu katkı maddeleri arasında yüksek fırın cürufunun da olduğunu bildirmişlerdir. Ancak zeminlerin farklı özelliklerinin olduğu ve farklı katkı maddelerinin zeminlerin farklı özelliklerini etkileyebileceğini söylemişlerdir. Özellikle kür periyotlarının serbest basınç dayanımına olumlu etki ettiğini bildirmişlerdir. Muhtaba ve ark., (2018), birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre CH ve CL sınıfına giren iki farklı zemin örneğine %0 ile %55 arasında değişen oranlarda YFC ilave ederek oluşturdukları deney numunelerinin davranışlarını incelemişlerdir. %50 YFC katkısında belirledikleri CBR değeri, CH için %3,2'den %11,5'e yükselirken, CL için bu değer %2,4 ile %10,7 arasında değişmiştir. %30 YFC katkılı CH için şişme potansiyelini %8'den %2'ye, %20 YFC katkılı CL için ise %5'ten %2'ye düşüğünü bildirmişlerdir. 28 gün kür ettikleri %30 YFC katkılı deney numunelerinin serbest basınç dayanımının yaklaşık %35 arttığını belirlemişlerdir. Çalışmalarının sonucu olarak bu atıkların bu tarz zemin ıslahı çalışmalarında kullanılmasının bu atıkları bertaraf etmekte etkili ve çevre dostu bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Preetham ve Nayak (2019), kil içerisine YFC katarak çeşitli deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Kilin kuru ağırlığına göre çeşitli yüzdelerde YFC (%10, %20, %30, %40 ve %50) ikame ederek deney numuneleri hazırlamışlardır. Deney numunelerinin özgül ağırlıklarını, kıvam limitlerini, kompaksiyon özelliklerini, serbest basınç dayanımlarını ve kayma dayanımı parametrelerini araştırmışlardır. 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri sonunda buldukları serbest basınç dayanımlarına göre %40 YFC katkılı zeminin optimum karışım olduğu sonucuna varmışlardır. Bu katkı oranındaki serbest basınç dayanımında, 28 günlük kür sonunda, yaklaşık 6 katlık bir artış olduğunu göstermişlerdir. Çalışmaları sonucunda, YFC'nin, inceledikleri kil için potansiyel bir stabilizatör olarak kullanılabileceği sonucuna

varmışlardır. Geçkil ve ark., (2020), yapmış oldukları çalışmada killi bir zemini YFC ile stabilize ederek stabilizasyon sonucu meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. Bunun için kil zemine ağırlıkça %5 ile %20 aralığında değişen miktarlarda YFC eklenerek hazırlanan deney numuneleri serbest basınç dayanımı ve CBR deneylerine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre en iyi dayanım %20 YFC ile elde edilmiştir. Bu içerikteki karışım numunelerinin 2,5 mm ve 5 mm'lik CBR değerlerinde katkısız zemine kıyasla sırasıyla 13 ve 11,96 kat artış meydana gelmiştir. Meydana gelen bu önemli artış YFC'nin zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini göstermiştir. Yadu ve Tripathi (2013), YFC ile stabilize edilen bir zeminin geoteknik özelliklerinde meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. Bunun için zemin içine ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 oranlarında YFC ilave etmişlerdir. Çalışmalar sonucunda optimum YFC oranı %9 olarak belirlenmiş ve bu oranda zeminin serbest basınç dayanımının saf zemine kıyasla %28'lik bir artış gösterdiği belirlenmiştir. Bilici ve ark., (2020), killi bir zemine UK ve YFC ilave ederek zeminin serbest basınç dayanımını artırmaya çalışmışlardır. Bu amaçla zemine, %3 kireç oranını sabit tutarak %3, %6, %9, %12, %15 oranlarında UK ve %3, %6, %9, %12 oranlarında YFC ilave ederek deneyler yapmış ve elde ettikleri sonuçları değerlendirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre en iyi zemin dayanımının kireç (%3) + uçucu kül (%12) ile kireç (%3) + yüksek fırın cürufu (%9) karışımları ile sağlandığını belirtmişlerdir. Sarıcı (2019), puzolan ve geogrid ile iyileştirilen inşaat ve yıkıntı atıklarının granüler dolgu olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Atıklarının içerisine puzolan katkı maddesi olarak %5 ile %30 aralığında değişen miktarlarda UK ve YFC ilave etmiştir. Çalışmada, en efektif katkı oranını %20 YFC olarak belirlemiştir. %20 YFC katkılı deney numuneleri üzerinde, 7 ve 28 günlük kür sonucunda belirlediği serbest basınç dayanımlarının sırasıyla 14,7 ve 23,2; CBR değerlerinin ise sırasıyla 11,8 ve 25 kat artış gösterdiğini görmüştür. Uysal ve ark., (2020), atık ürün olan uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve cam tozunu kullanarak zemini stabilize edip, stabilizasyon sonucu meydana gelen değişimi incelemişlerdir. Çalışmada, ince taneli zemine ağırlıkça %10 ile %50 aralığında değişen oranlarda katkı maddesi ilave ederek zemini stabilize etmişlerdir. Çalışma neticesinde, YFC kullanılarak yapılmış olan iyileştirmede zeminin plastisite indisi değeri azalırken drenajsız kayma dayanımı artmıştır. Sharma ve Sivapullaiah (2016), UK ve YFC katkılarının zemin stabilizasyonu için kullanılma potansiyelini değerlendirmişlerdir. Stabilizasyon sonucunda, UK ve YFC katkılarının ilavesi ile zeminin likit limit ve plastisite indisi değerlerinin önemli ölçüde azaldığını, dayanımının ise arttığını belirlemişlerdir. Çalışmada ayrıca serbest basınç dayanımı deney sonuçlarına göre en efektif katkı oranı %20 YFC olarak belirlenmiştir. Bilge (2011), yapmış olduğu çalışmada killi zemini YFC, UK ve zeolit kullanarak stabilize etmeyi amaçlamıştır. Yaptığı çalışmada bentonit türü kile %10 oranında kireç ile %5, %10, %15 oranlarında UK, YFC ve zeolit ekleyerek deney numuneleri oluşturmuştur. Hazırladığı deney numunelerini özgül ağırlık, kıvam limitleri, hidrometre, kompaksiyon ve serbest basınç dayanımı deneylerine tabi tutmuştur. Sonuç olarak, CH sınıfı zeminlerde UK, YFC ve zeolit ile stabilizasyon yapılabileceğini önermiş ve 28 günlük kür sonunda %100 kil+%15 YFC+%15 zeolit ile en yüksek dayanım değeri elde etmiştir.

Literatür incelendiğinde katkı maddelerinin zemin ile etkileşimi üzerinde yapılan çalışmaların oldukça popüler olduğu ve son yıllarda bu çalışmaların giderek arttığı görülmüştür. Ancak incelenen çalışmalarda optimum katkı oranlarının ve dayanımı artırma miktarlarının birbirinden oldukça farklı olduğu görülmüştür. Bu sebeple farklı zeminlerde farklı katkıları kullanılarak, bu tarz çalışmaların artırılmasının gerekli olduğu düşünülmüştür. Çünkü bu tarz katkıların zemin iyileştirme uygulamalarında kullanımında hem zeminin hem de katkının özellikleri oldukça önem arz etmektedir. Bu çalışmada, deneysel çalışmalar için tercih ettiğimiz bölgesel bir zemin olan killi kum bir zeminin kompaksiyon parametreleri, serbest basınç dayanımı ve CBR değerleri üzerinde endüstriyel bir atık ürünü olan YFC'nin etkileri araştırılmıştır. Böylece YFC ile bölgesel bir zemin olan killi kum zemin arasındaki etkileşim incelenerek literatüre katkı sunulacağı düşünülmüştür.

2. Materyal ve Metot

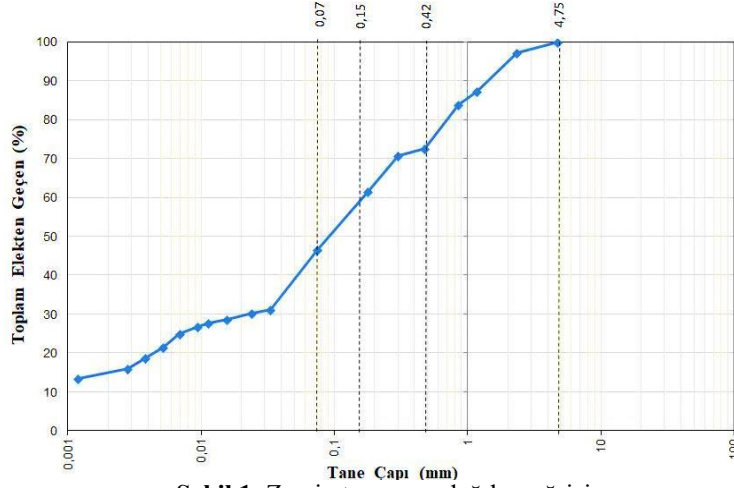
2.1. Materyal

2.1.1. Zemin Malzemesi

Bu çalışmada, stabilize edilen zemin numunesi İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi yerleşkesinden temin edilmiştir. Bu zeminin fiziksel özelliklerini tespit etmek için elek analizi, hidrometre, kıvam limitleri, piknometre ve standart Proktor deneyleri ilgili standartlara (ASTM C136M, ASTM D422-63, ASTM D4318 ve ASTM D854) uygun olarak yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 1'de, zemin tane çapı dağılım eğrisi ise Şekil 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Zeminin fiziksel özellikleri

Özellik	Değer
Tane birim hacim ağırlığı, γ_s (kN/m ³)	27,14
Likit limit, w_L (%)	25,87
Plastik limit, w_p (%)	15,56
Optimum su içeriği, w_{opt} (%)	14,10
Maksimum kuru birim hacim ağırlığı, γ_{kmax} (kN/m ³)	19,48
UCSC'ye göre sınıflandırma	SC
AASHTO'ya göre sınıflandırma	A-6



Şekil 1. Zemin tane çapı dağılım eğrisi

2.1.2. Yüksek Fırın Cürufu

Yapılan bu çalışmada zeminin dayanımını iyileştirmek amacıyla yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılmıştır. YFC demir-çelik üretimi esnasında yan ürün olarak açığa çıkmaktadır. Demir-çelik fabrikalarında 1 ton çelik üretimi esnasında yaklaşık 300 kg cüruf açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan bu miktar yüksek olduğu için depolanma açısından sorun teşkil etmektedir. Yeterli depolama alanı olmadığı durumda ise insan sağlığı ve çevre açısından büyük problemlere yol açmaktadır (İlıcılı, 1998). Çalışma esnasında kullanılan YFC, Karabük- Karçimsa firmasından temin edilmiş ve malzeme bileşenleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. YFC'nin bileşenleri

Özellik	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	S ⁻²	Mn ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	Cl ⁻
Bileşim (%)	32,47	32,45	1,25	9,94	9,31	0,82	0,33	3,51	0,85	1,16	0,31	0,015

2.2. Metot

Stabilizasyon için yapılan deneysel çalışmalar kapsamında ilk olarak zemin numunesi ve YFC katkısı 24 saat süreyle etüvde 105°C sıcaklıkta kurutulmuştur. Ardından literatürde yapılmış olan çalışmalar dikkate alınarak (Bilgen ve ark., 2010; Bilgen ve ark., 2012; Mujtaba ve ark., 2018; Sarıcı, 2019; Lakkimsetti ve Nayak, 2022) zemin içerisine ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 miktarlarında YFC katılarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Çalışmada, hazırlanmış katkısız (saf) ve katkılı (stabilize) deney numuneleri sırasıyla Saf Zemin, %5 YFC, %10 YFC, %15 YFC, %20 YFC, %25 YFC ve %30 YFC olarak isimlendirilmiştir. Saf ve YFC katkılı karışım numuneleri öncelikle standart Proktor (ASTM D698-12) deneyine daha sonra serbest basınç dayanımı (ASTM D2166/D2166M-16) ve CBR (ASTM D1883-21) deneylerine tabi tutularak mühendislik özellikleri belirlenmiştir.

2.2.1. Standart Proktor Deneyi

Bu çalışmada, katkısız ve YFC katkılı deney numunelerine öncelikle standart Proktor deneyi uygulanarak numunelerin optimum su içeriği (w_{opt}) ile maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaks}) değerleri belirlenmiştir. Ardından, bu değerler kullanılarak serbest basınç dayanımı ve CBR deneyleri için katkısız ve YFC katkılı zemin numuneleri hazırlanmıştır. Standart Proktor deneyinde, hem katkısız hem de YFC katkılı deney numuneleri hazırlanarak ASTM D698-12'ye uygun olarak deneyler yapılmıştır. Şekil 2'de standart Proktor deneyinin yapım aşamaları görülmektedir.



Şekil 2. Standart proktor deneyi

2.2.2. Serbest Basınç Dayanımı Deneyi

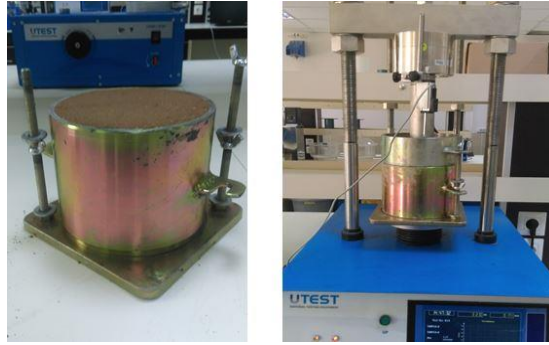
Standart Proktor deneyinden elde edilen w_{opt} ve γ_{kmaks} değerleri dikkate alınarak, katkısız ve YFC katkılı deney numuneleri ASTM D2166'ya uygun olarak hazırlanarak serbest basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur. Hazırlanan her bir deney numunesinin öncelikle boyutları ve kütlesi belirlenerek yoğunlukları kontrol edilmiş, ardından serbest basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerden sonra ise su içerikleri belirlenerek deney numunelerinin arzu edilen su içeriğinde olup olmadığı kontrol edilmiştir. Bununla birlikte, hazırlanan saf ve stabilize karışım deney numuneleri 1, 7 ve 28 günlük kür süreleri tamamlandıktan sonra serbest basınç dayanımı deneylerine maruz bırakılmıştır. Şekil 3'te serbest basınç dayanımı deney seti verilmiştir.



Şekil 3. Serbest basınç dayanımı deneyi seti

2.2.3. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi

CBR deneyleri için öncelikle w_{opt} ve γ_{kmaks} değerleri dikkate alınarak, katkısız ve YFC katkılı deney numuneleri hazırlanmıştır. CBR molduna yerleştirilip tabaka tabaka sıkıştırılan deney numuneleri üzerinde belirlenen kür süresi (1, 7 ve 28 gün) sonunda ASTM D1883-21'e göre CBR deneyi gerçekleştirilmiştir. CBR değeri, pistonun numuneye 2,5 mm ve 5 mm batması sonucu uygulanan yükün ASTM D1883-21'de belirtilen standart yüke yüzde olarak oranı şeklinde belirlenmiştir. Bu iki değer içinde elde edilen en yüksek değer CBR değeri olarak değerlendirilmiştir. CBR deney seti Şekil 4'te gösterilmiştir.

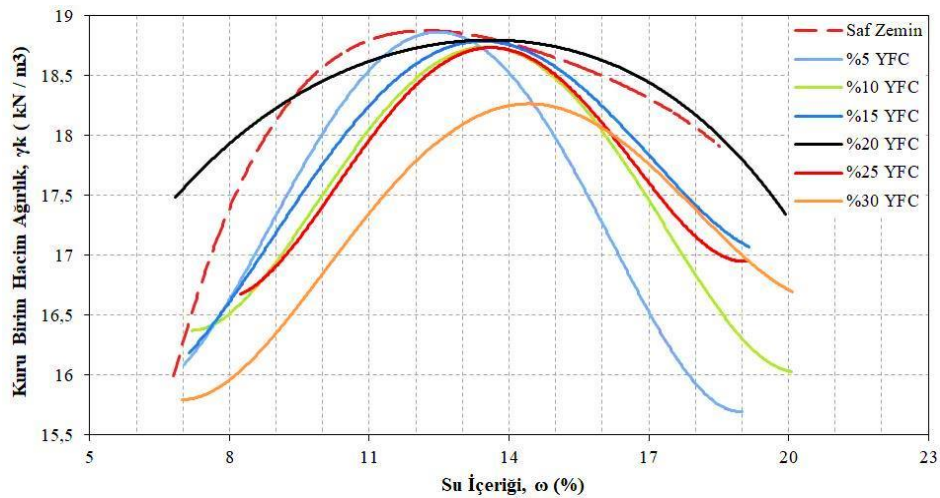


Şekil 4. CBR deney seti

3. Deney Bulguları

3.1. Standart Proktor Deney Sonuçları

Zemine ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında YFC katılarak saf ve stabilize deney numuneleri elde edilmiştir. Hazırlanmış olan saf ve stabilize deney numuneleri standart Proktor deneyine tabi tutulup, su içeriğine karşılık kuru birim hacim ağırlıkları tespit edilmiş ve kompaksiyon eğrileri Şekil 5'te sunulmuştur. Deney sonucunda numunelerin tespit edilen w_{opt} ve γ_{kmaks} değerleri Tablo 3'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Deney numunelerinin standart proktor deneyinden elde edilen kompaksiyon eğrileri

Tablo 3. Deneysel numunelerin standart proktor deneyinden belirlenen w_{opt} ve γ_{kmaks} değerleri

Deneysel Numunesi	Optimum Su İçeriği, Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı,	
	w_{opt} (%)	γ_{kmaks} (kN/m ³)
Saf Zemin	12,0	18,9
Saf Zemin+%5 YFC	12,6	18,8
Saf Zemin+%10 YFC	13,5	18,7
Saf Zemin+%15 YFC	13,4	18,8
Saf Zemin+%20 YFC	13,6	18,8
Saf Zemin+%25 YFC	13,6	18,7
Saf Zemin+%30 YFC	14,4	18,3

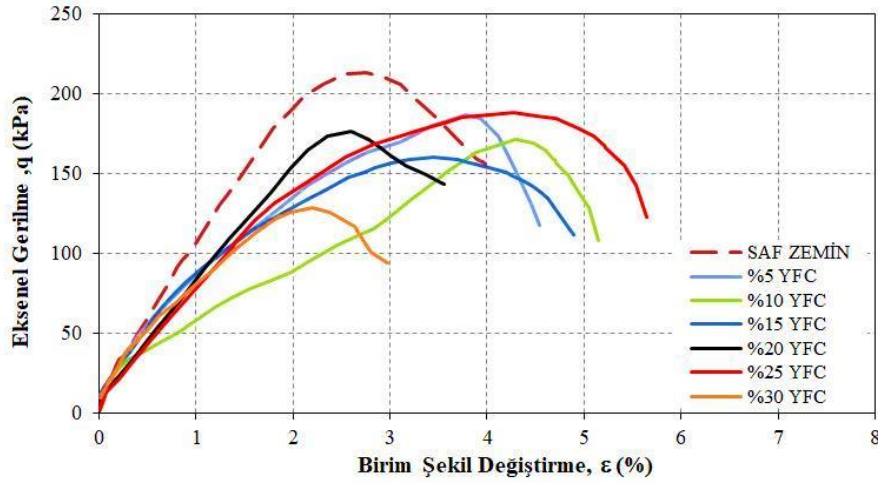
Şekil 5 ve Tablo 3'te sunulan standart Proktor deney sonuçları incelendiğinde, katkısız (saf) zemin içerisindeki YFC miktarı arttıka genel itibariyle optimum su içeriğinin arttığı ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının azaldığı görülmektedir. OluŐan bu durum, YFC'nin su emme kapasitesinin yüksekliğinden ve zeminden daha ince taneli ve hafif oluşundan kaynaklandığı Şeklinde yorumlanmıştır (Geçkil ve ark., 2020). Thomas ve ark., (2018) tarafından yapılan çalışma bu sonuçları doğrulamaktadır. Daha ince taneli ve hafif olan YFC zemine eklendikçe kütleyi azalttığı, aynı zamanda daha çok su talep ettiği içinde optimum su içeriğini artırdığı öngörülmüştür. Bununla birlikte YFC gibi katkılar zamanla dayanım kazandığından, deney sonuçlarının (kompaksiyon eğrileri ve parametreleri) etkilenmemesi için standart Proktor deney sürecinin olabildiğince çabuk tamamlanması gerektiği düşünülmüştür.

3.2. Serbest Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları

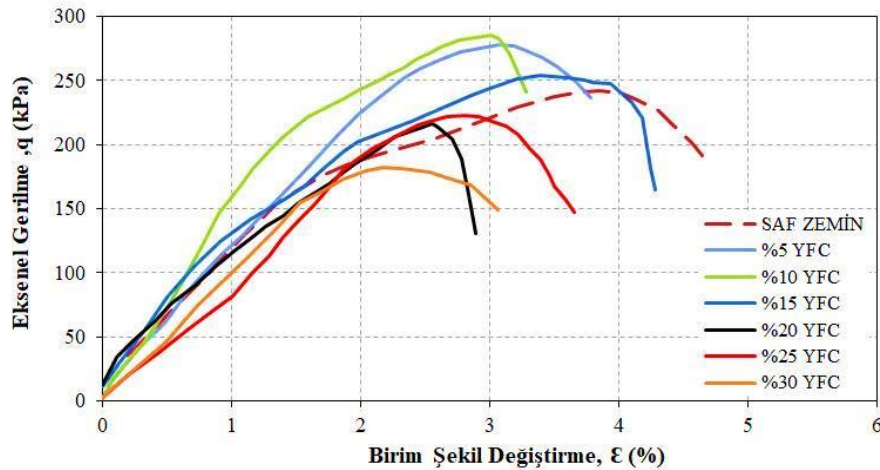
Standart Proktor deneyleriyle belirlenen γ_{kmaks} ve w_{opt} değerleri dikkate alınarak serbest basınç dayanımı deneyleri için deney numuneleri hazırlanmıştır. Serbest basınç dayanımı deneyinde her bir karışım oranı için üçer adet deney numunesi hazırlanmış daha sonra 1, 7 ve 28 günlük kür süresi tamamlandıktan sonra deneylere tabi tutulmuştur. Deney numunelerinin 1, 7 ve 28 günlük krleri sonucunda elde edilen gerilme (q) değerine karşılık Şekil değiştirme (E) grafikleri sırasıyla Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de görüldüğü gibidir. Ayrıca, elde edilen serbest basınç dayanımı (q_u) ile buna karşılık gelen birim Şekil değiştirme değerleri de Tablo 4'te verilmiştir.

Şekil 6'da görüldüğü gibi YFC katkılı zemin numunelerinin 1 günlük serbest basınç dayanım değerleri saf zemine kıyasla düşüktür. Ancak, Şekil 7 ve Şekil 8 incelendiğinde, hem 7 hem de 28 günlük kür sonucunda, saf zemine kıyasla, %10 YFC oranına kadar stabilize numunelerin serbest basınç dayanım değerlerinin önemli oranda (%10 YFC katkısında sırasıyla 1,18 ve 1,26 kat) arttığı görülmüştür. Serbest basınç dayanımlarındaki bu artıŐın, YFC'nin CaO değeri yüksek bir puzolanik malzeme oluşundan ve bu tür malzemelerin de zamanla dayanım kazanmasından meydana geldiği öngörülmüştür. Ayrıca Tablo 4'te açıkça görüldüğü gibi, kr süresinin serbest basınç dayanım değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Örneğin, %10 YFC katkılı deney

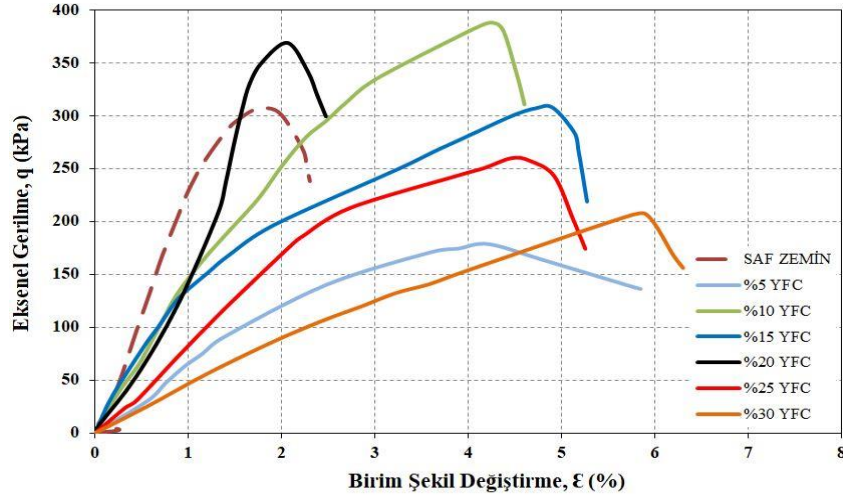
numunesinde 1 günlük kür süresine göre, 7 günde serbest basınç dayanımı 1,66 kat artarken 28 günde ise 2,26 kat artmıştır. Bununla birlikte 7 ve 28 günlük kür sürelerinde, %10'luk katkı orandan sonra (%15'ten %30'a kadar) serbest basınç dayanımının giderek azaldığı görülmüştür. Bu düşüşün, YFC'nin tepkimeye girmesi için gereken miktardan daha az su bulunmasından ve YFC'nin zeminden daha ince taneli oluşundan ileri geldiği tahmin edilmiştir. Elde edilen ve yorumlanan tüm bu sonuçları, literatürün de (Mujtaba ve ark., 2018; Preetham ve Nayak, 2019; Sarıcı, 2019; Geçkil ve ark., 2020; Lakkimsetti ve Nayak, 2022; Safi ve Singh, 2022) desteklediği görülmüştür. Tablo 4 incelendiğinde, hem 7 günlük hem de 28 günlük kür süresinde, optimum katkı oranının %10 YFC olduğu görülmekle birlikte en yüksek serbest basınç dayanım değerinin 28 günlük kür sonunda oluştuğu belirlenmiştir. Ancak, literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, en iyi dayanımı veren katkı oranının değişkenlik gösterebileceği tespit edilmiştir. Literatürdeki araştırmalarda (Çokça ve ark., 2009; Bilgen ve ark., 2012; Sivrikaya ve ark., 2014; Mujtaba ve ark., 2018; Preetham ve Nayak, 2019; Lakkimsetti ve Nayak, 2022) meydana gelen bu değişkenliğin kullanılan zeminin ve YFC'nin yapısal farklılıklarından kaynaklanabileceği şeklinde yorumlanmıştır.



Şekil 6. Deney numunelerinin q-ε grafiği (1 Günlük)



Şekil 7. Deney numunelerinin q-ε grafiği (7 Günlük)



Şekil 8. Deney numunelerinin q-ε grafiği (28 Günlük)

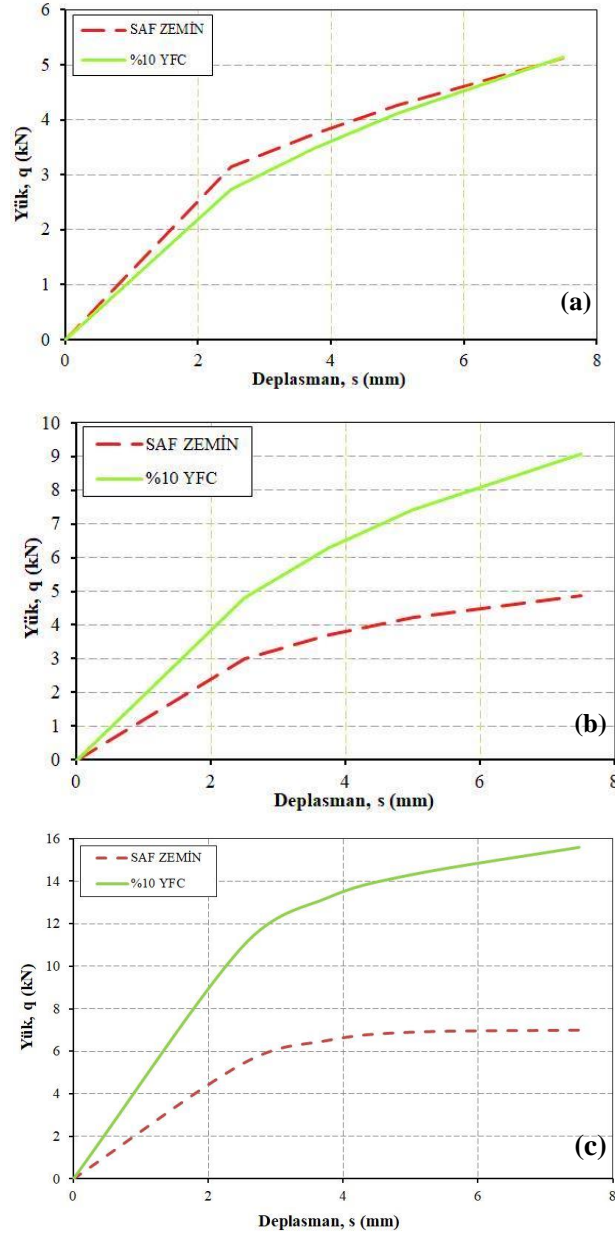
Tablo 4. Deney numunelerinin q_u değerine karşılık ε değerleri

Deney Numunesi	Serbest Basınç Dayanımı, q_u (kPa)			Birim Şekil Değiştirme, ε (%)		
	1 Günlük	7 Günlük	28 Günlük	1 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
Saf Zemin	231,46	242,29	306,79	2,76	3,86	1,74
Saf Zemin+%5 YFC	186,65	278,23	178,65	3,78	3,07	4,21
Saf Zemin+%10 YFC	171,36	285,11	388,08	4,32	3,01	4,23
Saf Zemin+%15 YFC	160,29	253,80	307,67	3,45	3,39	4,90
Saf Zemin+%20 YFC	176,17	215,95	368,96	2,59	2,56	2,06
Saf Zemin+%25 YFC	188,50	222,83	260,00	4,27	2,82	4,46
Saf Zemin+%30 YFC	128,59	182,46	207,06	2,19	2,18	5,92

3.3. CBR Deney Sonuçları

Serbest basınç dayanımı deneyleri sonucunda elde edilen en efektif katkı oranı %10 YFC olarak belirlendikten sonra saf ve %10 YFC katkılı stabilize zemin numuneleri hazırlanarak, numuneler 1, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda CBR deneyine maruz bırakılmıştır. CBR deneyi sonucunda 1, 7 ve 28 günlük kür süreleri için elde edilmiş olan yük-deplasman grafikleri Şekil 9’da, belirlenen CBR değerleri ise Tablo 5’te verilmiştir.

Şekil 9 ve Tablo 5’te açıkça görüldüğü gibi, 1 günlük kür sonunda saf zeminin CBR değerlerinin YFC katkılı numunelere göre daha yüksek iken, 7 ve 28 günlük kür sonunda ise saf zeminin CBR değerlerinin YFC katkılı numunelerin CBR değerlerinden daha düşüktür. Bu durumun serbest basınç dayanımı deneyinde sunulan yorumları desteklediği görülmüştür (Sarıcı, 2019; Geçkil ve ark., 2020; Safi ve Singh, 2022). Yapılan çalışmada 7 ve 28 günlük kür sonunda %10 YFC katkısı ile saf zemin CBR değerlerinin, sırasıyla, 1,69 ve 2,06 kat arttığı belirlenmiştir. Meydana gelen bu olumlu sonucun YFC’nin zeminlerin taşıma gücü üzerinde iyileştirici bir etkiye sahip olabileceğini gösterirken, daha önceden yapılan çalışmalar ile (Kuloğlu ve ark., 2006; Geçkil ve ark., 2020; Geçkil ve ark., 2021; Safi ve Singh, 2022; Lakkimsetti ve Nayak, 2022) uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 9. Saf ve %10 YFC katkılı numunelerin 1 (a), 7 (b) ve 28 (c) günlük yük-deplasman grafiği

Tablo 5. Saf ve %10 YFC katkılı deney numunelerinin CBR değerleri

Deney Numunesi	CBR Değeri (%)	
	2,5 mm oturma için	5 mm oturma için
Saf Zemin (1 Günlük)	6,08	5,48
Saf Zemin+%10 YFC (1 Günlük)	5,88	5,90
Saf Zemin (7 Günlük)	6,28	5,86
Saf Zemin+%10 YFC (7 Günlük)	10,39	10,63
Saf Zemin (28 Günlük)	6,87	6,51
Saf Zemin+%10 YFC (28 Günlük)	11,78	14,18

4. Sonuçlar

Killi kum zeminlerin dayanımı üzerinde YFC'nin etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada, yapılan standart Proktor, serbest basınc dayanımı ve CBR deneyleri neticesinde elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

- Killi kum zemin içerisindeki YFC oranının artışı ile genel itibariyle zeminin optimum su içeriğinde artış, maksimum kuru birim hacim ağırlığında ise azalış meydana gelmiştir. Ortaya çıkan bu durumun YFC'nin su emme kapasitesinin saf zemininkinden yüksek ve saf zemine göre daha ince taneli bir malzeme oluşundan kaynaklandığı dşnlmştir. Diğer bir deyişle, zemine artan miktarlarda YFC eklendiķe, YFC'nin zemine göre daha çok su talep etmesinden dolayı optimum su içeriği giderek artarken, YFC'nin zemine göre daha ince ve hafif olmasından dolayı da maksimum kuru birim hacim ağırlığı giderek azalmaktır.
- Serbest basınc dayanımı deneylerinden elde edilen sonuçlara göre en efektif katkı oranının, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda, %10 YFC olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, en yüksek dayanım değerinin 28 günlük kür sonunda %10 YFC katkısı ile elde edildiği grlmştir. Bu karışım oranındaki ve kr sresindeki katkılı zeminin serbest basınc dayanımının, saf zemininkine göre 1,26 kat fazla olduğu belirlenmiştir.
- CBR deneyi sonuçlarına göre 28 günlük kür sonunda %10 YFC katkısı ile saf zeminin CBR değerinin 2,06 kat arttığı tespit edilmiştir.
- Kr süresinin, hem serbest basınc dayanımı hem de CBR değerlerini önemli oranda artırdığı grlmştir. Bu durum YFC'nin zamanla dayanım kazandırdığını göstermektedir. Örneğin, %10 YFC katkılı serbest basınc dayanımı deney numunesinde, 1 günlük kür süresine göre, 7 günde serbest basınc dayanımı 1,66 kat artarken 28 günde ise 2,26 kat artmıştır. Bununla birlikte %10 YFC katkılı CBR deney numunesinde, 1 günlük kür süresine göre, 7 günde CBR değeri 1,80 kat artarken 28 günde ise 2,40 kat artmıştır.
- Hem serbest basınc dayanımı hem de CBR değerlerinde gözlemlenen dayanım artışının, YFC'nin iyileştirici bir etkiye sahip olduğunu ifade etmektedir. Herhangi bir alkali aktivatör kullanmadan ve oda sıcaklığında gerçekleşen bu etkinin, YFC'nin yüksek oranda CaO içermesinden ve oda sıcaklığında dahi reaksiyona girebilmesinden dolayı oluştuğu dşnlmştir.
- Serbest basınc dayanımı değerlerinde, %10'dan daha fazla oranlarda YFC eklendiķe dayanım değerlerinin giderek düştüğü grlmştir. Yeteri kadar su bulunmayan bir ortamda YFC'nin tepkimeye girmemesi ve böylece tepkimeye girmeyen saf zeminden daha ince tane çapına sahip YFC'nin dayanımı giderek düşürmesi bu durumun nedeni olarak ngrlmştir.

Sonuç olarak, killi kum zeminlere YFC eklenerek yapılan stabilizasyonun zeminin taşıma gücü üzerinde iyileştirici bir etkiye sahip olabileceği ve endüstriyel bir atık ürünü olan YFC'nin kullanımı ile ekonomiye ve çevreye katkı sağlanabileceği öngörülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Biriminin İÜBAP FYL 2021/2800 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı BAP Koordinasyon Birimine teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı

Bu çalışmanın tüm yazarları, çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Araştırmanın konusu birinci ve ikinci yazar tarafından belirlenmiştir. Tüm yazarlar deneysel tasarımı planlayıp çalışmalarını birlikte yürütmüştür. Ayrıca, tüm yazarlar, makale yazımı ve görselleştirilmesine eşit oranda katkıda bulunmuştur.

Kaynakça

- ASTM C136M. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM International. West Conshohocken, PA. 2020.
- ASTM D1883-21. Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. ASTM International. West Conshohocken, PA. 2021.
- ASTM D2166. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM International. West Conshohocken, PA. 2016.
- ASTM D422-63. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soil. ASTM International. West Conshohocken, PA. 2016.
- ASTM D4318. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM International. West Conshohocken, PA. 2018.
- ASTM D698-12. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristic of Soil Using Standard Effort. ASTM International. West Conshohocken, PA. 2012.
- ASTM D854. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM International. West Conshohocken, PA. 2016.
- Bilge T. Yüksek fırın cürufu katkısının kil zeminlerin stabilizasyonuna etkisinin araştırılması. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir, Türkiye, 2011.
- Bilgen G., Kavak A., Çapar ÖF. Düşük plastisiteli bir kilde katkı olarak çelikhane curufunun kullanılması ve kireç ile etkileşimi. Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi 2012; 2(2): 30-38.

- Bilgen G., Kavak A., Yıldırım ST., Çapar ÖF. Yüksek fırın cürufunun inşaat sektöründeki yeri ve önemi. 2'nci Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi Bildirileri, 2010, Cilt 1: 506-513, Mersin.
- Bilici H., Okur DV., Türköz M., Savaş H. Kil zeminin dayanımı üzerinde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılarının etkisi ve karşılaştırmalı analizi. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2020; 9(2): 910-919.
- Çetin AY. Yüksek plastisiteli kil zeminlerin alternatif malzemeler ile yüzeysel zemin stabilizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, İstanbul, Türkiye, 2011.
- Çokça E., Yazıcı V., Özyayın, V. Granül yüksek fırın cürufu (GBFS) ve GBFS-çimento kullanılarak geniş killerin stabilizasyonu. Geoteknik ve Jeoloji Mühendisliği 2009; 27(4): 489-499.
- Geçkil T., Sarıcı T., Karabaş, B. Siyah karbon ile stabilize edilen taban zeminin yol esnek üst yapı maliyetine etkisi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2021; 23: 222-235.
- Geçkil T., Sarıcı T., Yıldırım ES. Kireç katkısı ile kil bir zeminin dayanımının iyileştirilmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi 2019; 34(4): 171-180.
- Geçkil T., Tanyıldızı MM., Yıldırım, ES. Yüksek fırın cürufu ile stabilize edilmiş killi bir zeminin yol esnek üstyapı tabaka kalınlıklarına ve maliyetine etkileri. Fırat University Journal of Engineering 2020; 32(2): 509-520.
- İlhalı M. Karayolu üstyapısında erdemir cürufunun kullanılabilirliğinin araştırılması. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, İstanbul, Türkiye, 1998.
- Kuloğlu M., Özden G., Kayalar A. Çelik cüruflarının dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği üzerine bir araştırma. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11'inci Ulusal Kongresi, 7-8 Eylül 2006, Trabzon.
- Lakkimsetti B., Nayak S. Experimental investigation and performance evaluation of lithomargic clay stabilized with granulated blast furnace slag and calcium chloride. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering 2022; 8(1): 1-16.
- Mujtaba H., Aziz T., Farooq K., Sivakugan N., Das BM. Improvement in engineering properties of expansive soils using ground granulated blast furnace slag. Journal of the Geological Society of India 2018; 92(3): 357-362.
- Öner A., Yıldırım T. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren ve içermeyen betonlarda kırmataş kumu içeriğinin beton özelliklerine etkisi. Deprem Sempozyumu, 2005, Kocaeli.
- Preetham HK., Nayak S. Geotechnical investigations on marine clay stabilized using granulated blast furnace slag and cement. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering 2019; 5(4): 1-12.
- Sarıcı T. Puzolan ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atıklarının granüler dolgu olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Malatya, Türkiye, 2019.
- Safi W., Singh S. Efficient & effective improvement and stabilization of clay soil with waste materials. Materials Today: Proceedings 2022; 51: 947-955.

- Sharma AK., Sivapullaiah PV. Ground granulated blast furnace slag amended fly ash as an expansive soil stabilizer. *Soils and Foundations* 2016; 56(2): 205-212.
- Sivrikaya O., Yavascan S., Cecen E. Effects of ground granulated blast-furnace slag on the index and compaction parameters of clayey soils. *Acta Geotechnica Slovenica* 2014; 11(1): 19-27.
- Thomas A., Tripathi RK., Yadu LK. A laboratory investigation of soil stabilization using enzyme and alkali-activated ground granulated blast-furnace slag. *Arabian Journal for Science and Engineering* 2018; 43(10): 5193-5202.
- Tokyay M., Erdoğdu K. Cürufklar ve cürufllu çimentolar. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, 2002.
- Uysal F., Yılmaz V., Topçu HM. Farklı atık malzemeler ile stabilize edilmiş ince daneli zeminin mühendislik özellikleri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 2020; 35(1): 19-26.
- Yadu L., Tripathi RK. Effects of granulated blast furnace slag in the engineering behaviour of stabilized soft soil. *Procedia Engineering* 2013; 51: 125-131.