4. Ulusal
Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu

14 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

GGM4

TARIMSAL ATIKLARDAN ÜRETİLEN BİYOKÖMÜRÜN ÇİMENTOLU ZEMİN STABİLİZASYONUNA ETKİSİ

EFFECT OF BIOCHAR PRODUCED FROM AGRICULTURAL WASTE ON CEMENTED SOIL STABILIZATION

Muhammet SARI[1]

ÖZET

Çimento esaslı zemin stabilizasyonu, problemli zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Ancak çimento maliyetlerinin artması ve üretimi sırasında ortaya çıkan yüksek karbon emisyonları, ciddi ekonomik ve çevresel sorunlara yol açmaktadır. Bu durum, çimento tüketimini azaltırken yeterli performansı koruyabilecek alternatif bağlayıcılar ve sürdürülebilir katkı maddelerine olan ilgiyi artırmaktadır. Bu çalışmada, bir tarımsal atık olan çay atıklarından elde edilen biyokömürün, çimento ile stabilize edilmiş killi kum zeminlerde kısmi ikame malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Zemin numuneleri, sabit çimento oranı (%5) ve değişen biyokömür ikame oranları (çimentonun %1, %2 ve %3'ü) ile hazırlanmıştır. Biyokömür ikamesinin zeminin 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri sonunda tek eksenli basınç dayanımı (UCS) ve kesme dayanımı üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Ayrıca, optimum biyokömür oranının 28 günlük kür süresi sonrasında mikroyapısal özelliklere etkisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri ile değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, %2 ikame oranındaki çay atığı kaynaklı biyokömürün zemin stabilizasyonunda çevre dostu bir katkı maddesi olarak etkin şekilde kullanılabileceği ve çimento tüketimini azaltarak sürdürülebilir uygulamalara katkı sağlayabileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Zemin stabilizasyonu, biyokömür, tarımsal atık*

ABSTRACT

Cement-based soil stabilization is a widely used method to improve the engineering properties of problematic soils. However, the increasing cost of cement and the high carbon emissions generated during its production lead to serious economic and environmental problems. This situation has increased interest in alternative binders and sustainable additives that can reduce cement consumption while maintaining adequate performance. In this study, the usability of biochar obtained from tea waste, an agricultural waste, as a partial replacement material in cement-stabilized clayey-sand soils was investigated. Soil samples were prepared with a fixed cement ratio (5%) and varying

[1] Arş. Gör. Dr., Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, muhammet.sari@erdogan.edu.tr

biochar replacement ratios (1%, 2%, and 3% of cement). The effects of biochar replacement on the uniaxial compressive strength (UCS) and shear strength of the soil after 7, 14, and 28 days of curing were systematically examined. In addition, the effect of the optimum biochar ratio on the microstructural properties after 28 days of curing was evaluated using scanning electron microscopy (SEM) analyses. As a result of the studies, it was determined that biochar derived from tea waste with a 2% substitution rate can be effectively used as an environmentally friendly additive in soil stabilization and can contribute to sustainable practices by reducing cement consumption.
Keywords: *Soil stabilization, biochar, agricultural waste*

1. GİRİŞ

Kentleşmenin ve altyapı gelişiminin hızlı genişlemesi, doğal zeminlerin yeterli mühendislik özelliklerine sahip olmadığı alanlarda çeşitli geoteknik problemleri önemli ölçüde artırmaktadır. Bununla birlikte, altyapıya olan artan talep ve yetkin doğal zeminin sınırlı bulunabilirliği, yetersiz mühendislik özelliklerine sahip zeminlerin yaygın kullanımına yol açmaktadır. Bunlar arasında killi kumlar, ulaşım, temel ve hafriyat projelerinde sıkça karşılaşılan bir zemin türü olup kaba kum taneciklerinin ve ince kil fraksiyonlarının bir arada bulunması, karmaşık mekanik davranışa yol açabilmektedir (Deng vd., 2017). İnce taneli içerikteki varyasyonlar, bu tür zeminlerin mekanik tepkisini önemli ölçüde değiştirebilir ve kayma mukavemetini, rijitliğini, oturma davranışını ve genel stabilitesini etkileyebilir. Bu nedenle, killi kumların mühendislik performansının iyileştirilmesi, geoteknik mühendisliğinde önemli bir konu haline gelmiştir.

Çimentolu zemin stabilizasyonu, zayıf ve yetersiz mühendislik özelliklerine sahip zeminlerin mekanik ve hidrolik özelliklerini iyileştirmek için en etkili ve yaygın olarak benimsenen zemin iyileştirme tekniklerinden biridir (Yılmaz vd., 2022). Uygun bağlayıcı maddelerin eklenmesi ve yeterli sıkıştırma uygulanmasıyla, zemin yapısı, parçacıklar arasında çimentolu bağların oluşumu yoluyla değiştirilebilir. Bu işlem, parçacıklar arası bağları ve parçacıkların birbirine kenetlenmesini artırarak, mukavemet, rijitlik, taşıma kapasitesi, dayanıklılık ve deformasyona karşı dirençte önemli iyileşmeler sağlar. Bu nedenle, çimento ile stabilize edilmiş zeminler, sığ temeller, dolgular, şev stabilizasyonu, sıvılaşma riski ve ulaşım altyapısı için zemin iyileştirme dahil olmak üzere çok çeşitli geoteknik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Abut vd., 2023). Sıradan Portland çimentosu, uzun zamandır çok çeşitli zemin profilleri için etkili ve yaygın bir kimyasal stabilizasyon aracı olarak kullanılmaktadır. Popülaritesi, yaygın bulunabilirliğinden, saha uygulamasının kolaylığından, nispeten düşük maliyetinden ve geoteknik mühendisliği özelliklerinde sürekli iyileşme sağlamasından kaynaklanmaktadır (Pishvari vd., 2026). Hidratasyon işlemi sırasında, çimento, zemin parçacıklarının etrafında sürekli bir çimentolu matris oluşturan reaksiyon ürünleri üretir ve üstün mekanik performansa sahip bir zemin yapısı oluşturur. Bu hidratasyon ürünlerinin oluşumu, killi kumların sıkışabilirliğini ve geçirgenliğini azaltırken, basınç ve kayma mukavemetini önemli ölçüde artırır (Moon vd., 2020). Sonuç olarak, çimento stabilizasyonu hem araştırma hem de pratik mühendislik projelerinde benimsenen standart zemin iyileştirme tekniklerinden biri haline gelmiştir.

Teknik avantajlarına rağmen, Portland çimentosuna olan yoğun bağımlılık önemli çevresel ve sürdürülebilirlik endişelerini gündeme getirmektedir. Çimento üretimi önemli miktarda enerji tüketimi gerektirir ve özellikle küresel iklim değişikliğine önemli ölçüde katkıda bulunan karbondioksit olmak üzere büyük miktarda sera gazı emisyonundan sorumludur

(Wassie ve Demir, 2024). Dahası, çimento bazlı stabilizatörlerin kullanımı, alkaliliği artırarak çevredeki zeminin kimyasal özelliklerini değiştirebilir ve potansiyel olarak yeraltı suyu kalitesini ve ekolojik dengeyi etkileyebilir (Abbasi, vd., 2025). Bu çevresel etkiler, araştırmacıları ve uygulayıcıları, stabilize edilmiş zeminlerin mekanik performansından ödün vermeden çimento tüketimini azaltacak stratejiler aramaya yöneltmektedir. Bu nedenle son yapılan araştırmalar giderek Portland çimentosunun kısmen veya tamamen yerini alabilecek sürdürülebilir alternatiflerin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, silika dumanı, pirinç kabuğu külü ve doğal puzolanlar dahil olmak üzere çok çeşitli endüstriyel yan ürünler ve tamamlayıcı çimentolu malzemeler, zemin stabilizasyon uygulamalarında umut verici performans göstermiştir (Çelik vd., 2025; Blayi vd., 2025). Ayrıca, alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılar, jeopolimerler ve biyolojik bazlı stabilizatörlere dayalı yeni teknolojiler, daha düşük çevresel etkileri ve zemin mukavemetini ve dayanıklılığını artırma yetenekleri nedeniyle giderek daha fazla ilgi çekmektedir (Nunez vd., 2026). Biyolojik bazlı stabilize malzemelerinden biri olan biyokömür (BC) sahip olduğu özellikler sayesinde zeminlerin stabilizasyonunda yeni bir yaklaşım sunmaktadır.

Biyokömür (BC), oksijen yetersizliği koşullarında biyokütlenin termokimyasal dönüşümüyle elde edilen karbonlu bir malzemedir ve en yaygın kullanılan üretim yöntemi pirolizdir. Geniş bir yelpazedeki tarımsal kalıntılar, orman yan ürünleri ve hayvansal atıklar hammadde olarak kullanılabilir; bu da biyokömürü çevresel olarak sürdürülebilir bir ürün haline getirirken aynı zamanda atık değerlendirmesi ve uzun vadeli karbon depolama için etkili bir yol sağlar (Mohan vd., 2014). İyi gelişmiş gözenek ağı, yüksek özgül yüzey alanı, düşük yoğunluk, mükemmel su tutma kapasitesi ve kimyasal olarak aktif yüzey fonksiyonel grupları nedeniyle biyokömür, son zamanlarda hem inşaat hem de geoteknik mühendisliğinde uygulamalar için önemli bir ilgi çekmiştir (Bian vd., 2025).

Biyokömürün çimento bazlı sistemlere dahil edilmesi, hidratasyon ve mikroyapısal gelişim üzerindeki olumlu etkisi nedeniyle kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Hem mikro dolgu maddesi hem de iç kürleme ajanı olarak işlev gören biyokömür, gözenekli yapısı içinde suyu tutabilir ve çimento hidratasyonu sırasında kademeli olarak serbest bırakarak daha yoğun bir çimento matrisi ve iyileştirilmiş hidratasyon verimliliği sağlar. Birçok çalışma, uygun biyokömür içeriğinin basınç dayanımını artırdığını, tokluğu geliştirdiğini, geçirgenliği azalttığını ve klorür ve sülfat maruziyeti gibi agresif çevresel koşullara karşı direnci artırdığını bildirmiştir (Restuccia vd., 2020; Gupta ve Kua, 2020). Ek olarak, biyokömürün çatlak direncini artırma, kendiliğinden iyileşmeyi teşvik etme ve geçirgen betonun yapısal performansını artırma yeteneği gösterdiği, aynı zamanda sızan sudan kirleticilerin uzaklaştırılmasına katkıda bulunduğu gösterilmiştir (Xie vd., 2021).

Geoteknik mühendisliğinde, biyokömür, toprak performansını iyileştirmek ve geleneksel stabilizasyon uygulamalarının çevresel etkisini azaltmak için umut vadeden bir katkı maddesi olarak ortaya çıkmıştır. Biyokömür parçacıkları ile zemin matrisi arasındaki etkileşim, gözenek yapısını değiştirebilir, toplam gözenekliliği artırabilir, nem düzenlemesini iyileştirebilir ve yoğunluğu azaltabilir, böylece zeminlerin hidrolik ve mekanik davranışını iyileştirebilir. Örneğin Villarreal ve Wang, (2021) şişen zeminler için, biyokömürün suyu öncelikli olarak emerek ve nemin yeniden dağılımını kolaylaştırarak şişmeyi azalttığı, aynı zamanda geçirgenliği iyileştirdiği ve su tutma süresini azalttığını göstermiştir. Önceki araştırmalar, uygun şekilde seçilmiş biyokömür tipi, parçacık boyutu ve dozunun sıkışabilirliği azaltabileceğini, kayma dayanımını artırabileceğini ve mühendislik performansından ödün vermeden stabilize edilmiş zeminlerde çimentonun kısmen yerini alabileceğini göstermiştir (Lau vd., 2023). Bu birleşik çevresel ve

mühendislik avantajları, biyokömürü dayanıklı, düşük karbonlu çimentolu kompozitler ve sürdürülebilir zemin iyileştirme teknolojileri geliştirmek için uygulanabilir bir alternatif olarak öne çıkarmaktadır.

Bu çalışmada killi kumların çimento ile stabilizasyonuna bir alternatif olarak ülkemizde fazla miktarda tüketilen çayın üretiminde açığa çıkan atıklardan elde edilen biyokömürün çimento ikamesi olarak kullanılabilirliği ele alınmıştır. Bu amaç doğrultusunda %5 çimento içeren zemin örnekleri hazırlanmış ve çay atıklarından elde edilen biyokömür farklı oranlarda (ağırlıkça %1, %2 ve %3) çimentoya ikame edilmiştir. Hazırlanan karışımlar değişen kür süreleri (7, 14 ve 28 gün) sonucunda mekanik (tek eksenli basınç dayanımı ve kayma gerilmesi) ve mikroyapısal (taramalı elektron mikroskobu) testlere tabi tutularak biyokömürün zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliği ortaya konmuştur.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Karışım Bileşenleri ve Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışma kapsamında kullanılan zemin örnekleri Doğu Karadeniz'de yer alan bir şantiye sahasından alınmıştır. Daha sonra zemin, Atterberg limitleri, özgül ağırlık, tane boyutu dağılımı ve kompaksiyon dahil olmak üzere çeşitli deneysel testlere tabi tutularak fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Zemin örneğine ait fiziksel özelliklerin özeti Tablo 1'de sunulmuştur. Elde edilen veriler ışığında zemin Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS) kullanılarak killi kum (SC) olarak sınıflandırılmıştır. Buna ek olarak yapılan çalışmada CEM I 42.5R (OPC) tipi çimento kullanılmıştır. Ayrıca, tarımsal faaliyetler sonucu açığa çıkan çay atıklarından elde edilmiş biyokömür de yapılan deneylerde çimento ikamesi olarak değerlendirilmiştir. Çay atığı biyokömürü (BC), Rize'de bulunan ve çay atıklarından mangal kömürü üreten aktif bir tesisten temin edilmiştir. 600°C'lere kadar gerçekleştirilen piroliz işlemleri sonucunda elde edilen bu ürün bilyalı değirmende öğütüldükten (D_{50} değeri yaklaşık 12,5 μm) sonra karışımlarda kullanılmıştır. Tablo 2'de karışımda kullanılan malzemelere ait XRF (X-Işını Floresans) analizi sonucu elde edilen kimyasal bileşenler sunulmuştur.

Tablo 1. Zemine ait fiziksel özellikler

Özellikler	Değer
Plastik limit, PL (%)	26
Likit limit, LL (%)	43
Plastisite indeksi, PI (%)	17
Kum (4,75-0,075) (%)	85
75 μm'lik elekten geçen (%)	15
Özgül ağırlık (Gs)	2,5
Optimum su içeriği (%)	28
Maksimum kuru yoğunluk (g/cm^3)	1,37

Karakterizasyon işlemlerinin ardından stabilize çalışmaları için araziden toplanarak laboratuvar ortamına getirilen zemin örneği 105°C'de etüvde kurutulduktan sonra 2 mm'lik bir elekten geçirildi. Zemin başlangıçta likit limit değerinde nem içeriğiyle hazırlandı. Çimento, zeminin kuru ağırlığının %5'i oranında eklenirken, su/bağlayıcı oranı 1'de sabit tutuldu. Biyokömür, çimentonun %1, %2 ve %3'ü oranlarında ikame edildi. Çimento-biyokömür karışımı önce kendi içerisinde homojen olacak şekilde karıştırıldıktan sonra likit limit değerinde nem içeriğine sahip killi kum ile, otomatik bir mikser kullanılarak 5-

10 dakika boyunca iyice karıştırıldı. Elde edilen karışım daha sonra serbest basınç deneyi ve kesme kutusu deneyi için silindirik (50mm×100mm) ve kare (60mm×60mm) kesitlerine sahip kalıplara vibratör ve/veya sıkıştırma yardımıyla aktarıldı. Hazırlanan örnekler plastik kapak ve streçlerle sarıldıktan sonra daha önceden belirlenen kür sürelerini (7, 14 ve 28 gün) beklemek için kürleme kabinine yerleştirildi.

Tablo 2. Zemin, çimento ve biyokömüre ait oksitli bileşenler

Bileşenler	SC	OPC	BC
SiO_2	52,26	17,21	3,72
Fe_2O_3	14,10	3,56	6,87
CaO	0,85	63,25	20,33
MgO	1,67	1,34	2,97
Al_2O_3	26,75	5,86	4,03
K_2O	1,72	0,83	42,20
TiO_2	1,23	0,27	0,25
Na_2O	0,74	0,39	0,12
Diğer	0,68	7,29	19,51

2.2. Kullanılan Yöntemler

Serbest Basınç Deneyi

Tek eksenli basınç dayanımı (UCS) deneyleri, stabilize edilmiş zemin örneklerinin hedef kürleme sürelerine ulaştıktan sonraki dayanımını belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu deney aracılığıyla numunelerin mukavemeti ve gerilme-birim şekil değiştirme davranışı tespit edilmiştir. UCS deneyleri, UTEST marka 50 kN kapasiteye sahip 1mm/dk sabit yükleme hızında otomatik kontrollü elektromekanik test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Her bir kür süresi için bir çift numune deneye tabi tutulmuş ve sonuçlar bu numunelerin ortalamasının alınmasıyla hesaplanmıştır.

Direkt Kesme Kutusu Deneyi

Kesme kutusu deneyleri için standart ölçülerdeki (60×60×25 mm) kalıplarda hazırlanan zemin örnekleri hedef kürlenme sürelerinin tamamlanmasının ardından, maksimum 5000 N kapasiteli UTEST marka direkt kesme cihazı kullanılarak test edilmiştir. Güvenilirliği sağlamak için her gerilim seviyesinde en az üç tekrarlı numune test edilerek 50, 100 ve 150 kPa normal gerilimler uygulanmıştır. Kesme işlemi, dakikada 0,5 mm'lik sabit bir yatay hareket oranı altında gerçekleştirilmiştir ve elde edilen kesme kuvveti-yer değiştirme tepkileri otomatik bir veri toplama sistemi aracılığıyla sürekli olarak kaydedilmiştir.

Taramalı Elektron Mikroskop Analizi

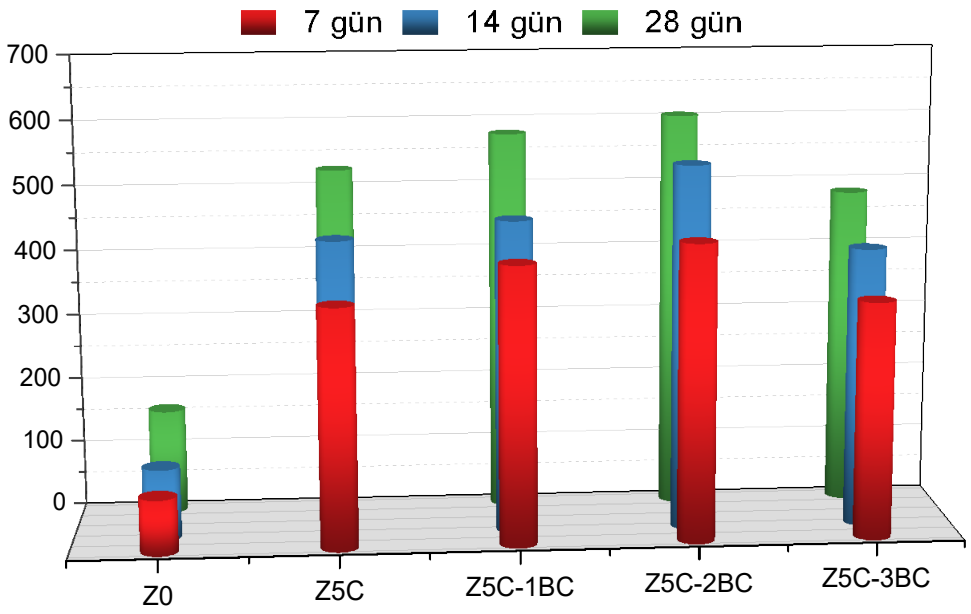
Stabilizasyon sonucu oluşan hidratasyon ürünlerinin morfolojisini değerlendirmek ve zemin örneklerinin mikroyapısal özelliklerini incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Mikroyapısal analizler, 3 nm uzamsal çözünürlüğe, 5× ila 1.000.000× büyütme aralığına, 0,9 nA emisyon akımına ve 20 kV hızlandırma voltajına sahip bir JEOL JSM-6510 taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mekanik testlerin (UCS) ardından, mikroskobik inceleme için teste tabi tutulan zemin örneklerinden toplanan temsili örnekler küçük parçalara ayrılmış ve doğru ölçüm elde edebilmek için 50°C'nin altında bir sıcaklıkta kurutulmuştur. Gözlemden önce, kurutulmuş numuneler elektriksel iletkenliği ve görüntü kalitesini iyileştirmek için ince bir altın tabakasıyla kaplanmıştır ve görüntüler incelenen özelliklere bağlı olarak uygun büyütmelerde elde edilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Bağlayıcı İçeriğinin UCS Değerleri Üzerindeki Etkisi

Şekil 1'de verilen tek eksenli basınç dayanımı (UCS) sonuçları hem çimento ilavesinin hem de kürlenme süresinin killi kumun dayanımını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Bağlayıcı içermeyen zemin (Z0), tüm kürlenme sürelerinde en düşük UCS değerlerini sergilerken, %5 çimento ile stabilize edilmiş numune (Z5C), çimentolu hidratasyon ürünlerinin oluşumu nedeniyle önemli bir iyileşme göstermiştir. Tüm karışımlarda, UCS kürlenme süresiyle birlikte artmış ve 28 gün sonra en yüksek değerlere ulaşmıştır.

Çimentonun biyokömür ile ikame edilmesi de dayanım gelişimini doğrudan etkilemiştir. Biyokömür içeren karışımlar arasında, Z5C-2BC tüm kürlenme sürelerinde en yüksek UCS değerlerine ulaşmış olup 7, 14 ve 28 gün için sırasıyla yaklaşık 448 kPa, 550 kPa ve 603 kPa değerlerine ulaşmıştır. Elde edilen bu sonuçlar optimum biyokömür ikame oranının zemin stabilizasyonuna olumlu katkıda bulunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, biyokömür içeriğinin artması (Z5C-3BC), dayanımda kademeli bir azalmaya neden olmuş, ancak bu karışımlar yine de bağlayıcı içermeyen zemin örneklerinden daha iyi bir performans sergilemiştir. Bu davranış, belirli miktarda biyokömürün zeminin yapısını iyileştirebileceğini, aşırı ikamenin ise etkili çimento içeriğini ve dolayısıyla çimentolu bağlayıcı ürünlerin oluşumunu azalttığını göstermektedir. Genel olarak, sonuçlar Z5C-2BC karışımının basınç dayanımı açısından optimum biyokömür ikame seviyesini temsil ettiğini göstermektedir.



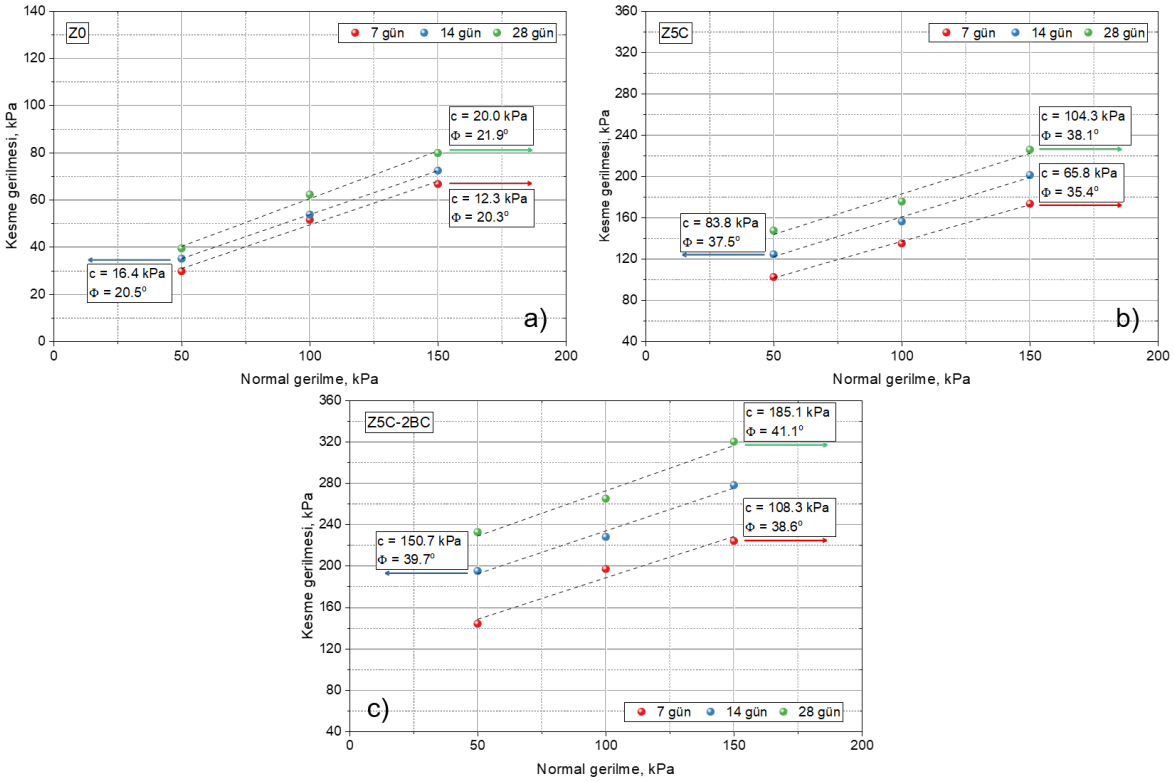
Şekil 1. Farklı bağlayıcı içeriği ve kür sürelerine bağlı UCS değerleri

3.2. Bağlayıcı İçeriğinin Kesme Gerilmesi Değerleri Üzerindeki Etkisi

Şekil 2'de verilen direkt kesme deneyi sonuçları hem çimento stabilizasyonunun hem de kürlenme süresinin killi kumun kesme dayanımı parametrelerini önemli ölçüde

iyileştirdiğini göstermektedir. Bağlayıcı içermeyen zemin (Z0) ile karşılaştırıldığında, çimento ile işlem görmüş zemin numuneleri tüm kürlenme sürelerinde daha yüksek kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (φ) sergilemiştir. Genel olarak, her iki parametre de kürlenme süresiyle artmış, bu da çimentolu bağların sürekli oluşumunu ve bunun sonucunda zemin yapısının iyileşmesini yansıtmıştır.

Stabilize edilmiş karışımlar arasında, biyokömür içeren numune (Z5C-2BC) en yüksek kesme dayanımını göstermiş olup, kohezyon 7. günde 108,3 kPa'dan 28. günde 185,1 kPa'ya, içsel sürtünme açısı ise 38,6°'den 41,1°'ye yükselmiştir. Bu sonuçlar, biyokömürün eklenmesinin, stabilize edilmiş zeminin tanecikler arası bağını ve sürtünme direncini artırdığını göstermektedir. Genel olarak, bulgular, çimento stabilizasyonunun uygun bir biyokömür ikame oranıyla (%2) birleştirilmesinin, özellikle daha uzun kürleme sürelerinden sonra, killi kumun kayma dayanımı özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebileceğini göstermektedir.



Şekil 2. Farklı kür sürelerine bağlı kesme gerilmesi değerleri a) Z0, b) Z5C ve c) Z5C-2BC

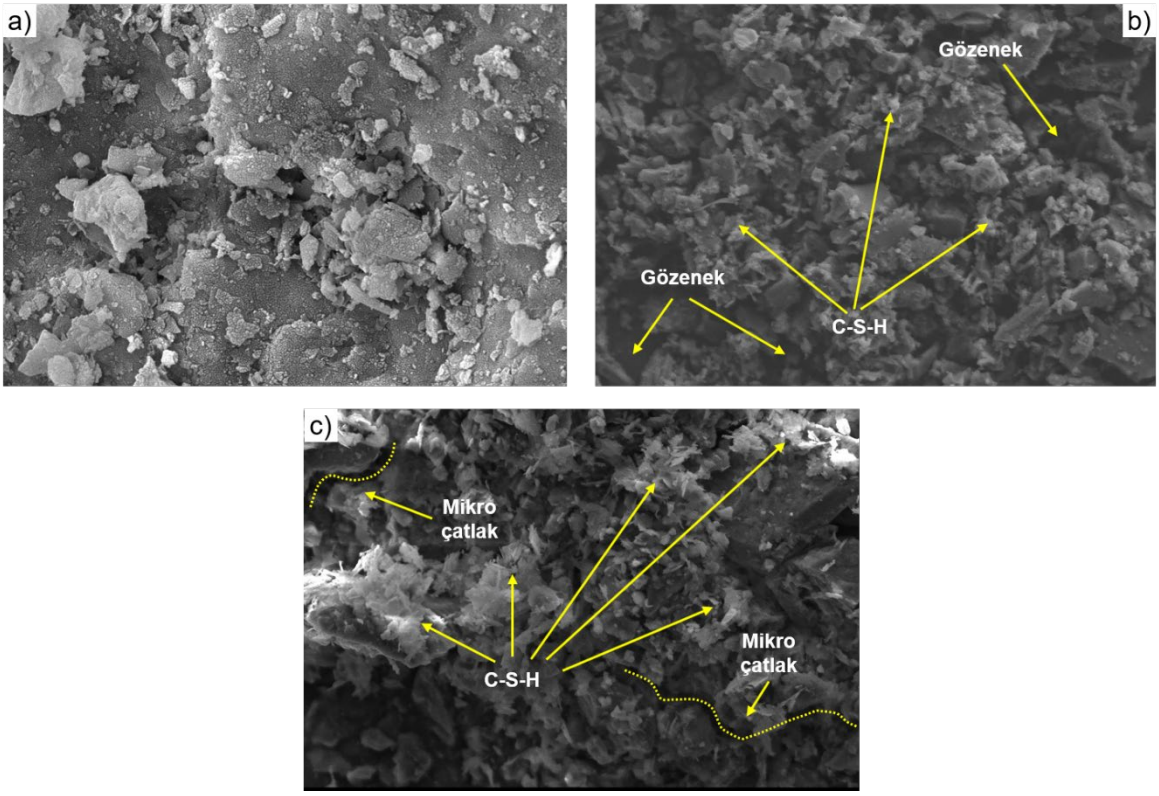
3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu Sonuçları

Şekil 3 28 günlük kürleme sonrasında yapılan SEM gözlemlerini göstermekte olup, mekanik dayanım sonuçlarını destekleyen mikroyapısal kanıtlar sunmaktadır. Hiçbir bağlayıcı içermeyen zemin örneğinde (Z0), büyük boşluklar, zayıf tanecik temasları ve zemin parçacıkları arasında yetersiz bağ ile karakterize edilen nispeten gevşek ve heterojen bir yapı sergilemektedir (Şekil 3a). Çimentolu ürünlerin yokluğu, gözenekli bir matrisle sonuçlanmıştır; bu da Z0 örneği için elde edilen daha düşük serbest basınç dayanımı ve kesme dayanımı değerleriyle tutarlıdır.

Şekil 3b'de verilen %5 çimentolu numunenin (Z5C), SEM görüntüsü, Z0'a kıyasla daha yoğun ve daha kompakt bir mikroyapı ortaya koymuştur. Özellikle kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jelleri olmak üzere hidratasyon ürünlerinin oluşumu, gözenekleri dolduran ve zemin parçacıklarını birbirine bağlayan çimentolu malzemeler olarak gözlemlenebilir. Bu yeni oluşan bağlar, boşluk oranını azaltır ve parçacıkların birbirine kenetlenmesini iyileştirir; bu da bağlayıcı içermeyen zemine kıyasla basınç ve kesme dayanımındaki önemli artışı açıklamaktadır.

Şekil 3c'de görüldüğü üzere %2 oranında biyokömürün kısmi çimento ikamesi olarak eklenmesi (Z5C-2BC), zeminin mikroyapısında daha fazla değişikliğe yol açmıştır. Biyokömür parçacıklarının gözenekli yüzey yapısı, hidratasyon ürünlerinin çökelmesi için ek alanlar sağlar ve daha birbirine bağlı bir çimento ağının gelişmesine katkıda bulunur. Biyokömür parçacıkları ayrıca mikro dolgu maddesi görevi görerek boşlukları doldurabilir ve zemin parçacıklarının paketlenme düzenini iyileştirebilir.

SEM görüntüsünde gözlemlenen daha yoğun matris ve gelişmiş bağ, özellikle kohezyon ve serbest basınç dayanımı açısından bu karışım için elde edilen daha yüksek mukavemet değerleriyle tutarlıdır. Ancak, biyokömürün etkinliği, ikame oranına büyük ölçüde bağlıdır. %2 biyokömür ilavesi gibi optimum bir seviyede, gözenek doldurma, iç kürleme ve iyileştirilmiş hidratasyonun olumlu etkileri, çimento içeriğindeki azalmayı telafi edebilir. Bu nedenle, SEM gözlemleri, Z5C-2BC karışımının iyileştirilmiş mekanik performansını ve daha kompakt bir mikroyapının oluşumunu doğrulamaktadır.



Şekil 3. 28 günlük SEM görüntüleri a) Z0, b) Z5C ve c) Z5C-2BC

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında zeminlerin stabilizasyonunda kullanılan çimentonun yerine bölgesel bir tarım ürünü olan çayın atıklarından elde edilen biyokömürün kullanılabilirliği incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda, işlenmiş çay atıklarından elde edilen biyokömür farklı ikame oranlarında (ağırlıkça %1, %2 ve %3) çimento yerine kullanılmıştır. CEM I 42,5R çimento tipi ve sabit çimento oranı (%5) kullanılarak farklı kür süreleri (7, 14 ve 28 gün) için üretilen zemin örnekleri üzerinde serbest basınç ve direkt kesme kutusu deneyleri uygulanarak biyokömür için optimum ikame oranı belirlenmiştir. Ayrıca, stabilize edilen zemin örneklerinin morfolojik/mikroyapısal özellikleri SEM yöntemi ile ele alınmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde aşağıdaki temel sonuçlar elde edilmiştir:

- Çimentonun biyokömür ile kısmi ikamesi, stabilize edilmiş zeminin mühendislik davranışını olumlu yönde etkilemiştir. İncelenen karışımlar arasında, %2 biyokömür ikamesi içeren numune (Z5C-2BC) tüm kür sürelerinde en iyi UCS performansı sergilemiştir.
- Direkt kesme testi sonuçları, çimento ve biyokömür stabilizasyonunun, hem kohezyonu (c) hem de içsel sürtünme açısını (φ) artırarak killi kumun kesme gerilmesini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. En yüksek kesme gerilmesi parametreleri, biyokömürle modifiye edilmiş numune için 28 günlük kürleme sonrasında elde edilmiş olup, bu durum çimento hidratasyonu ve biyokömür ilavesinin birleşik etkisinin daha güçlü parçacıklar arası bağ ve daha yoğun bir toprak yapısı oluşturduğunu göstermektedir.
- SEM gözlemleri, çimento ve biyokömür ile işlenmiş numunelerde daha yoğun ve daha homojen bir mikroyapı ortaya koyarak deneysel bulguları doğrulamıştır. Geliştirilmiş parçacık bağlaması ve azaltılmış gözenek boşlukları, artan dayanım özelliklerini net bir şekilde açıklamaktadır.
- Sonuçlar, biyokömürün zemin stabilizasyonunda sürdürülebilir bir kısmi çimento ikamesi olarak kullanılabileceğini, çimento tüketimini ve bununla ilişkili çevresel etkileri azaltırken mühendislik performansını iyileştirmeye katkıda bulunduğunu göstermektedir.

Bu çalışma, biyokömürün killi kumun stabilizasyonunda kısmi çimento ikamesi olarak potansiyelini gösterse de uzun vadeli performansını daha ayrıntılı değerlendirmek için ek araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda, biyokömürle stabilize edilmiş zeminlerin ıslatma-kurutma ve donma-çözülme döngüleri gibi çevresel koşullar altındaki dayanıklılığını, hidrolik davranışlarını ve hacimsel stabiliteleri araştırılacaktır. Ayrıca, pratik geoteknik uygulamalar için optimum koşulları belirlemek amacıyla farklı biyokömür hammaddelerinin, üretim sıcaklıklarının ve ikame oranlarının mikro yapı ve mekanik performans üzerindeki etkileri incelenecektir.

KAYNAKLAR

Abbasi, F., Choobbasti, A.J. ve Roushan, K. (2025), "Advanced stabilization of clayey sand using xanthan gum: Insights from multiscale evaluation and ultrasonic pulse velocity analysis", Results in Engineering, Vol 25, 104419.

Abut, Y., Bozbey, İ. Ve Kurt Bal, E. (2023), "Sustainability of lime stabilized road subgrade in mountainous regions of Türkiye", Journal of Mountain Science, Vol 20, 2436-2452.

Bian, X., Wang, H., Shi, X., Peng, W., Xu, G. ve Qiu, C. (2025), "Effect of biochar on the mechanical properties of MgO activated slag stabilized slurry soil", Developments in the Built Environment, Vol 24, 100789.

Blayi, R.A., Kakrasul, J.I. ve Hamad, S.M. (2025), "An overview of rice husk ash as a waste by-product material for sustainable soil stabilization", Cleaner Waste Systems, Vol 12, 100446.

Çelik, S., İkizler, S.B., Aqra, D. ve Angın, Z. (2025), "Using sea shell, lime and zeolite as additives in the stabilization of expansive soils", Turkish Journal of Civil Engineering, Vol 36, 21-37.

Deng, Y., Wu, Z., Cui, Y., Liu, S. ve Wang, Q. (2017), "Sand fraction effect on hydro-mechanical behavior of sand-clay mixture", Applied Clay Science, Vol 135, 355-361.

Gupta, S. ve Kua, H.W. (2020), "Combination of biochar and silica fume as partial cement replacement in mortar: Performance evaluation under normal and elevated temperature", Waste and Biomass Valorization, Vol 11, 2807-2824.

Lau, J., Biscontin, G. ve Berti, D. (2023), "Effects of biochar on cement-stabilised peat soil", Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, Vol 176, 76-87.

Mohan, D., Sarswat, A., Ok, Y.S. ve Pittman Jr,C.U. (2014), "Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent–a critical review", Bioresource Technology, Vol 160, 191-202.

Moon, S.W., Vinoth, G., Subramanian, S., Kim, J. ve Ku, T. (2020), "Effect of fine particles on strength and stiffness of cement treated sand", Granular Matter, Vol 22, 9.

Nunez, V., Lotero, A., Moncaleano, C.J. ve Consoli, N.C. (2026), "Characterization of the cemented matrix formed by alkali-activated ground granulated blast furnace slag in stabilized filtered gold tailings", Transportation Geotechnics, Vol 64, 102257.

Pishvari, M.N., Hassanzadeh-Aghdam, M.K., Kozegar, E. ve Ahmadi, H. (2026), "Boundary-condition-dependent mechanical response of clayey sand stabilized with cement and nano-MgO", Results in Engineering, Vol 29, 109807.

Restuccia, L., Ferro, G.A., Suarez-Riera, D., Sirico, A., Bernardi, P., Belletti, B. ve Malcevschi, A. (2020), "Mechanical characterization of different biochar-based cement composites", Procedia Structural Integrity, Vol 25, 226-233.

Villarreal, J. ve Wang, F. (2021), "Feasibility study on biochar-treated expansive soils", International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, Vol 7, 27.

Wassie, T.A. ve Demir, G. (2024), "Mechanical strength and microstructure of soft soil stabilized with cement, lime, and metakaolin-based geopolymer stabilizers", Advances in Civil Engineering, Vol 2024, 6613742.

Xie, C., Yuan, L., Tan, H., Zhang, Y., Zhao, M. ve Jia, Y. (2021), "Experimental study on the water purification performance of biochar-modified pervious concrete", Construction and Building Materials, Vol 285, 122767.

Yılmaz, F., Sadoğlu, E. ve Kamiloğlu, H.A. (2022), "Evaluation of the effect of waste zeolite on the strength and micro-macrostructure of a high plasticity clayey soil stabilized with lime-waste zeolite mixtures subjected to freezing–thawing cycles", Arabian Journal of Geosciences, Vol 15, 480.