Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

Farklı Katkı Maddeleri ile İyileştirilmiş Kil Zeminin Donma-Çözülme Davranışının Konsolidasyona Etkisi

İlkim ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ [1,a], **Baki BAĞRIAÇIK** [1,b]

[1]*Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye*

[a]***ORCID***: *0009-0001-1729-2471;* [b]***ORCID***: *0000-0002-1860-2881*

Makale Bilgileri

Geliş : 24.02.2026
Kabul : 04.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1895808

Sorumlu Yazar

İlkim ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ
iozbahceci@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Zemin iyileştirme
Atık
Donma-çözülme
Konsolidasyon
Sürdürülebilirlik

Atıf şekli: *ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ, İ., BAĞRIAÇIK, B., (2026). Farklı Katkı Maddeleri ile İyileştirilmiş Kil Zeminin Donma-Çözülme Davranışının Konsolidasyona Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 651-662.*

ÖZ

Bu çalışmada, yüksek plastisiteli kil zeminin konsolidasyon davranışı ve donma-çözülme çevrimleri sonrasındaki mühendislik özellikleri, kiremit tozu ve akasya zamkı katkıları kullanılarak deneysel olarak araştırılmıştır. Bu kapsamda, doğal kil zemine kuru ağırlığının %3'ü oranında kiremit tozu, %1'i oranında akasya zamkı ve her iki katkının birlikte kullanıldığı farklı karışım kombinasyonları ilave edilmiştir. 5 günlük kür süreci sonrasında numuneler, 1, 3, 5 ve 10 tekrarlı donma-çözülme çevrimleri uygulanmıştır. Kullanılan katkı malzemelerinin ve donma-çözülme etkisinin, zeminin konsolidasyon katsayısı ile hacimsel sıkışma katsayısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Katkı uygulamaları sonucunda konsolidasyon katsayısında görülen artış, zeminin konsolidasyon sürecini daha hızlı tamamlamasını sağlarken; hacimsel sıkışma katsayısındaki azalma, uygulanan yükler altında zeminin daha düşük sıkışabilirlik sergilediğini göstermiştir. Bu değişimler, zeminin aşırı oturma eğiliminin azaltılması ve donma-çözülme çevrimleri sırasında oluşabilecek yapısal bozulmaların sınırlandırılması açısından olumlu bir gelişme olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, kiremit tozu ve akasya zamkı katkılarının hem donma-çözülme öncesinde hem sonrasında kil zeminin konsolidasyon davranışı üzerinde iyileştirici etki oluşturduğu belirlenmiştir.

Effect of Freeze-Thaw Behavior on Consolidation of Clay Soil Improved with Different Additives

Article Info

Received : 24.02.2026
Accepted : 04.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1895808

Corresponding Author

İlkim ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ
iozbahceci@cu.edu.tr

Keywords

Soil improvement
Waste
Freeze–thaw
Consolidation
Sustainability

How to cite: *ÖZBAHÇECİ GÖKDENİZ, İ., BAĞRIAÇIK, B., (2026). Effect of Freeze-Thaw Behavior on Consolidation of Clay Soil Improved with Different Additives. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 651-662.*

ABSTRACT

In this study, the consolidation behavior and post-freeze-thaw engineering properties of high plasticity clay soil were experimentally investigated using brick dust and acacia gum additives. Within this scope, brick dust at 3% and acacia gum at 1% of the dry weight, along with various mixture combinations utilizing both additives together, were added to the natural clay soil. Following a 5-day curing period, the samples were subjected to 1, 3, 5, and 10 freeze-thaw cycles. The effects of the additive materials and freeze-thaw action on the coefficient of consolidation and the coefficient of volume compressibility of the soil were examined. The increase observed in the coefficient of consolidation as a result of the additive applications enabled the soil to complete its consolidation process more rapidly; meanwhile, the decrease in the coefficient of volume compressibility indicated that the soil exhibited lower compressibility under applied loads. These changes were considered a positive development in terms of reducing the excessive settlement tendency of the soil and limiting the structural deterioration that may occur during freeze-thaw cycles. In conclusion, it was determined that brick dust and acacia gum additives have an improving effect on the consolidation behavior of clay soil both before and after freeze-thaw cycles.

1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliği; taşıyıcı sistemler, yapı malzemeleri, ulaştırma, hidrolik ve geoteknik mühendisliği gibi çok sayıda alt disiplini bünyesinde barındıran, toplumların altyapı ve üstyapı ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik temel bir mühendislik dalıdır. Bu alt disiplinler içerisinde yer alan geoteknik mühendisliği, yapıların inşa edildiği zemin ortamının davranışını esas alması nedeniyle insan yaşamı açısından son derece kritik bir öneme sahiptir. Geoteknik mühendisliği; zeminlerin ve kaya ortamlarının fiziksel, mekanik ve hidrolik özelliklerinin belirlenmesi, bu özelliklerin mühendislik yapıları üzerindeki kısa ve uzun vadeli etkilerinin değerlendirilmesi ve zeminden kaynaklanabilecek olası problemlerin önlenmesine veya giderilmesine yönelik yöntemlerin geliştirilmesi ile ilgilenmektedir. Doğal zeminler, jeolojik oluşum süreçleri ve mineralojik bileşimleri nedeniyle oldukça heterojen bir yapı sergilemektedir. Bu durum, zeminlerin taşıma gücü, sıkışabilirlik, drenaj kabiliyeti ve çevresel etkilere karşı dayanım gibi mühendislik parametrelerinde önemli farklılıklara yol açmaktadır. Özellikle ince taneli zeminler, düşük drenaj kapasiteleri ve yüksek sıkışabilirlikleri nedeniyle aşırı oturma, taşıma gücü yetersizliği ve stabilite problemleri oluşturabilmektedir. Bu tür problemler, insanların barınma, ulaşım ve diğer temel ihtiyaçlarını karşılamak üzere inşa edilen yapıların güvenliğini ve servis ömrünü doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, geoteknik mühendislerinin temel görevlerinden biri, problemli zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirerek güvenli ve ekonomik yapı tasarımına olanak sağlayacak stabilizasyon yöntemlerini geliştirmektir. Zemin iyileştirme uygulamaları kapsamında; mekanik yöntemler (kompaksiyon), hidrolik yöntemler (drenaj), derin temel sistemleri (kazıklar) ve kimyasal ya da fiziksel katkı malzemeleri ile stabilizasyon teknikleri yaygın biçimde kullanılmaktadır. Son yıllarda özellikle katkı malzemeleri ile zemin stabilizasyonu, uygulama kolaylığı, ekonomik avantajları ve zemin davranışı üzerindeki olumlu etkileri nedeniyle öne çıkmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde, bir yandan sanayi yan ürünleri ve atık malzemeler yeniden değerlendirilerek çevresel yükler azaltılmakta, diğer yandan zeminlerin taşıma gücü, oturma davranışı ve durabilite özellikleri önemli ölçüde iyileştirilebilmektedir. Böylece hem çevresel sürdürülebilirlik hem de mühendislik performansı açısından bütüncül bir çözüm elde edilmektedir. Güncel araştırmalar, atık materyallerin ve biyopolimerlerin zemin stabilizasyonunda etkin ve sürdürülebilir alternatifler sunduğunu ortaya koymaktadır. Atık malzemeler, geri dönüştürülebilir ve düşük maliyetli olmaları sayesinde doğal kaynak tüketimini azaltırken; biyopolimerler, doğal kökenli ve çevre dostu yapıları nedeniyle sürdürülebilir mühendislik uygulamalarında önemli bir yer edinmektedir. Bu çalışma kapsamında da atık bir malzeme olan kiremit tozu (KT) ile biyopolimer esaslı bir katkı olan akasya zamkının birlikte kullanılmasıyla kil zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmış; elde edilen bulguların hem mühendislik performansı hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Kiremit tozu, kırılmış, üretim fazlası veya kullanım dışı kalmış kiremitlerin öğütülmesiyle elde edilen ince taneli bir atık malzemedir. Pişirilmiş kil esaslı yapısı nedeniyle içeriğinde SiO_2 (silis), Al_2O_3 (alümina), Fe_2O_3 (demir oksit), CaO (kireç), MgO ve çeşitli alkali oksitler bulunmaktadır. Bu kimyasal bileşim, kiremit tozunun dolgu etkisi yaratmasının yanı sıra, belirli koşullarda puzolanik reaksiyonlar göstermesine de olanak sağlamaktadır. Gözenekli ve hafif yapısı, kolay temin edilebilirliği ve düşük maliyeti nedeniyle birçok sektörde yaygın olarak kullanılmakta olup, bu çalışmada da zemin stabilizasyonunda katkı malzemesi olarak tercih edilmiştir. Kiremit tozuna ek olarak kullanılan akasya zamkı (AZ), doğal polisakkarit yapıya sahip bir biyopolimerdir. Biyopolimerler, zemin taneleri arasında bağlayıcı bir ağ oluşturarak kohezyonun artmasına ve boşluk yapısının düzenlenmesine katkı sağlamaktadır. Bu mekanizma sayesinde zemin içerisinde permeabilite azalmakta, dayanım artmakta ve uzun dönem oturma davranışı iyileştirilmektedir. Literatürde yer alan birçok çalışma, biyopolimer katkılarının zeminlerin mekanik özellikleri üzerinde olumlu etkiler oluşturduğunu ortaya koymuştur. Akasya zamkının toksik olmaması, çevreye zarar vermemesi ve uygulama kolaylığı da bu malzemenin tercih edilmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu iki katkı malzemesi birlikte kullanılarak, kil zeminin konsolidasyon davranışı ve donma–çözülme döngüleri sonrasındaki performansı detaylı olarak incelenmiştir. Donma–çözülme olayı, zemin içerisindeki gözenek suyunun sıcaklık değişimleriyle birlikte donarak hacimsel genleşme göstermesi ve ardından çözülerek tekrar sıvı hâle geçmesi sürecidir. Bu süreç, özellikle mevsimsel sıcaklık farklarının yüksek olduğu bölgelerde zemin yapısını önemli ölçüde etkilemektedir. Donma sırasında, gözeneklerdeki suyun hacim artışı zemin tanelerini birbirinden uzaklaştırmakta ve özellikle ince taneli zeminlerde kapiler su hareketiyle buz merceklerinin oluşmasına neden olmaktadır. Çözülme aşamasında ise zemin yapısında meydana gelen bozulmalar sonucunda taşıma gücü azalmakta ve kalıcı oturmalar meydana gelmektedir.

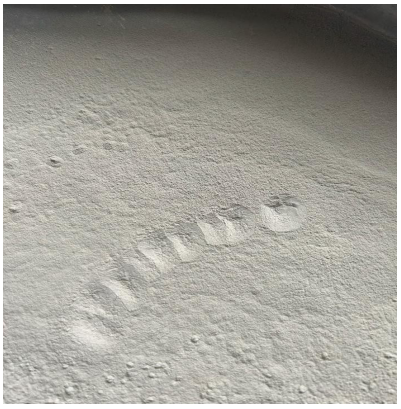
Donma–çözülme döngüleri, zemin mukavemetini azaltmakta, zemin–temel etkileşimini olumsuz yönde etkilemekte ve mühendislik yapılarında servis dışı kalmalara ve kalıcı deformasyonlara yol açabilmektedir. Bu etkiler özellikle siltli ve killi zeminlerde daha belirgin olup, kumlu zeminlerde suyun daha serbest hareket edebilmesi nedeniyle nispeten daha sınırlıdır. Donma–çözülme dayanımının belirlenebilmesi amacıyla, laboratuvar ortamında zemin numuneleri belirli sıcaklık aralıklarında tekrarlanan çevrimlere maruz bırakılmakta ve çevrimler sonrasında basınç dayanımı, hacim değişimi ve geçirgenlik gibi parametreler değerlendirilmektedir. Bu tür olumsuz etkileri azaltmak amacıyla gerçekleştirilen zemin iyileştirme çalışmalarında çimento, kireç, mermer tozu, uçucu kül ve geopolimer esaslı bağlayıcılar sıklıkla kullanılmaktadır.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde; Javed ve Chakraborty [1], kil zeminin iyileştirilmesinde cam atık çamurunun etkinliğini araştırmış ve optimum katkı oranını %8 olarak belirlemişlerdir. Bağrıaçık ve arkadaşları [2], akasya zamkı biyopolimerinin kum zeminlerin dayanım ve geçirgenlik özellikleri üzerindeki olumlu etkilerini ortaya koymuştur. Albayrak ve arkadaşları [3], biyopolimer ve lif katkılarının birlikte kullanımının kil zeminlerin donma–çözülme sonrası mukavemetini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Orman [4], farklı katkı maddelerinin kil zeminlerin dayanım özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiş; Teber ve Akoğuz [5] ise biyopolimer ve kireç katkılarının donma–çözülme davranışını iyileştirdiğini belirtmiştir. Tunç ve arkadaşları [6], Arabik Gam biyopolimerinin kil zeminlerin konsolidasyon davranışını olumlu yönde etkilediğini; Poyraz ve Ural [7] ise atık porselen karosu katkısının kil zeminlerin mühendislik özelliklerini geliştirdiğini ortaya koymuştur. Yılmaz [8] uçucu kül katkısı ile çalışmış dayanımda artışlar elde etmiştir. Aksoy ve Yıldırım [9], kaolin kili içerisine polipropilen lif eklemişlerdir. Polipropilen lifi eklenen numunelerin serbest basınç mukavemetinin, katkısız kile göre yaklaşık 2 katına çıktığı gözlemlenmiştir. Bağrıaçık ve Deniz [10] yumuşak kilin içerisine içme suyu arıtma tesisi çamurunun (DWTS) eklemişlerdir. Farklı oranlarda atık çamur ekleyerek zeminin taşıma gücüne etkisini incelemişlerdir. En verimli sonuçların %10 karışım oranında elde edilmiştir. Singh ve arkadaşları [11] atık lastik parçalarını kil zemine eklemiş dayanımı incelemişlerdir. Sonuç olarak zeminin taşıma kapasitesini ve kayma direncini arttırdığı, likit limitini artırıp plastik limiti düşürdüğü gözlemlenmiştir. Uçkaç ve arkadaşları [12] killi kum zemine atık cam tozunun geopolimerizasyonunun mekanik etkisini incelemişlerdir. Geopolimerleştirilmiş cam tozu ilavesinin zeminin su ihtiyacını azaltırken yoğunluğunu artırdığı ve özellikle %30 cam tozu ile yüksek kür sıcaklığının serbest basınç dayanımını en üst seviyeye çıkardığı görülmüştür. Chavan ve arkadaşları [13] tuğla tozu, mermer tozu, plastik atık ve ahşap testere tozu gibi atık malzemelerin killi zeminin mekanik özellikleri üstüne etkisin incelemişlerdir. Sonuçta özellikle yüzde 4 oranında testere tozu ve yüzde 10 oranında tuğla tozu ilavesinin zeminin CBR değerlerinde en yüksek artışı sağladığı görülmüştür. Yapılan kapsamlı literatür taraması sonucunda, kiremit tozunun zemin iyileştirme alanında farklı mühendislik özelliklerine etkisinin araştırıldığı çalışmalar bulunmakla birlikte, özellikle donma–çözülme çevrimleri altındaki davranışının yeterince detaylı incelenmediği tespit edilmiştir. Ayrıca, biyopolimerlerin tek başına zemin stabilizasyonundaki performanslarını değerlendiren araştırmalar mevcut olmasına rağmen, biyopolimer ve kiremit tozu katkılarının birlikte kullanıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu durum, mevcut araştırmanın özgünlüğünü ve bilimsel katkı potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, hem kiremit tozunun donma–çözülme koşulları altındaki davranışının değerlendirilmesi hem de biyopolimer ile kullanımının etkilerinin incelenmesi, literatürdeki önemli bir boşluğu dolduracak nitelikte olup çalışmaya yenilikçi ve özgün bir değer kazandırmaktadır.

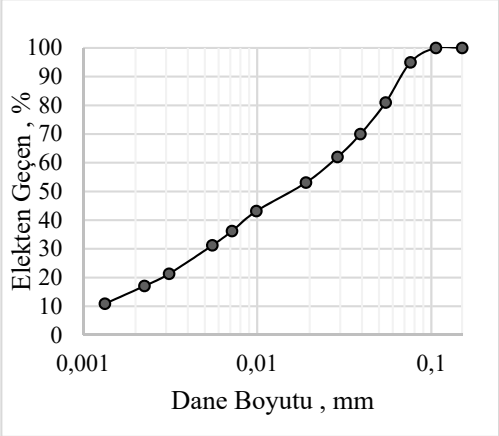
2. YÖNTEM

2.1. Materyal

Bu çalışmada kullanılan doğal kil zemin numuneleri, Adana ili Sarıçam ilçesi sınırlarından temin edilmiştir (Şekil 1). Kil, tane çapı 0,002 mm'den küçük olan mineral tanelerinden oluşan ince daneli bir zemin türüdür ve zemin davranışı, bu ince taneli yapısına bağlı olarak yüksek plastisiteli özellikler göstermektedir. Kullanılan kil zemin numunesi üzerinde, TS 1900-1[14] standardına uygun olarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda, özgül ağırlığı 2,63 g/cm³, maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1,69 g/cm³ ve optimum su içeriği %21 olarak belirlenmiştir. Numunenin likit limiti %51, plastik limiti %28 bulunmuş ve buna göre zemin sınıflandırması, USCS (Unified Soil Classification System) sistemi kullanılarak yüksek plastisiteli kil (CH) olarak belirlenmiştir (Şekil 2) [15].



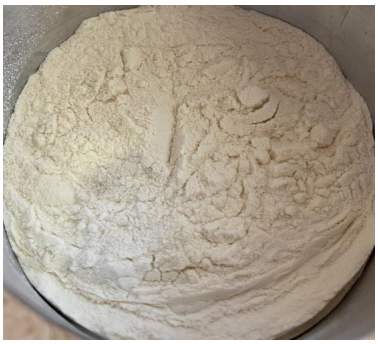
Şekil 1. Doğal kil numunesi (öğütme sonrası)



Şekil 2. Kil zemin granülometri eğrisi

Bu yüksek plastisiteli kil zemin, yüksek su tutma kapasitesi, düşük permeabilite ve özellikle zamana bağlı oturma davranışına sahip olması nedeniyle yüksek oturma potansiyeline sahiptir. Çalışmada, zemin oturma potansiyelinin azaltılması hedeflenmiştir. Ayrıca, zemin mevsimsel sıcaklık değişimlerine bağlı olarak maruz kaldığı donma-çözülme (D-Ç) davranışı açısından incelenecek ve çevrim öncesi ve sonrası mühendislik parametreleri değerlendirilmiştir.

Zemin iyileştirmede kullanılan katkı malzemelerinden biri olan Akasya Zamkı (AZ), doğal kökenli bir biyopolimerdir ve gıda, inşaat gibi farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sarımsı, yarı saydam bir görünüm sergileyen AZ (Şekil 3), suda tamamen çözülerek viskoz bir jel formu oluşturur ve bu özellik zemin içerisinde homojen bir dağılım sağlar. Akasya zamkının fiziksel yapısını daha detaylı karakterize etmek amacıyla lazer tanecik boyutu analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre malzemenin özgül yüzey alanı 127,8 m²/kg olarak ölçülmüştür. Ortalama parçacık boyutu dağılımı verileri incelendiğinde; malzemenin hacimsel olarak %10'unun 16,5 µm, %50'sinin 49,8 µm ve %90'ının 128 µm boyutunun altında olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 1).



Şekil 3. Akasya zamkı

Çizelge 1. AZ kimyasal ve fiziksel özellikler [6]

Ph	4,7
Renk	Sarımsı beyaz toz
Nem	9,40%
Toplam kül	3,30%
Toplam ağır metal	<5 ppm
Kurşun	<1 ppm
Arsenik	<3 ppm
Cıva	<1 ppm
Katminyum	<1 ppm
Özgül yüzey alanı	127,8 m²/kg
Parçacık boyutu D_{x10}	16,5 µm
Parçacık boyutu D_{x50}	49,8 µm
Parçacık boyutu D_{x90}	128 µm

Diğer bir katkı malzemesi olan KT ise, kullanım ömrünü tamamlamış veya üretim sürecinde ortaya çıkan atık kiremitlerin öğütülmesiyle elde edilen kil esaslı seramik kökenli bir malzemedir. KT, gözenekli ve sert yapısı sayesinde zemin iyileştirme çalışmalarında farklı mühendislik amaçlarla kullanılabilmektedir (Şekil 4). Kil oranı yüksek ve ince taneli zeminlerde KT kullanımı özellikle önemlidir; küçük tane boyutu, boşlukları doldurarak sıkışabilirliği artırır ve puzolanik reaksiyonlar aracılığıyla zemin yapısını güçlendirir. Bu sayede taşıma gücü artar, oturma ve şişme gibi mühendislik problemleri kontrol altına alınabilir.

AZ ve KT katkıları, CH zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde, oturma kontrolü sağlamak amacıyla kullanılmış ve bu katkıların D-Ç davranışı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir.



Şekil 4. Kiremit tozu

Konsolidasyon deneylerinde kullanılacak karışım oranları ise CH tipi kil zemin üzerinde gerçekleştirilen detaylı serbest basınç dayanımı (SBD) testlerinin sayısal sonuçlarından elde edilmiştir. Katkısız kil zeminin (KZ) başlangıçtaki serbest basınç dayanımı 1,22 kg/cm² olarak ölçülmüştür. KT katkısının mekanik dayanım etkisini incelemek amacıyla sırasıyla %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında karışımlar hazırlanmış; bu numunelerden elde edilen SBD değerleri sırasıyla 2,72 kg/cm², 2,90 kg/cm², 3,25 kg/cm², 3,06 kg/cm² ve 3,00 kg/cm² olarak tespit edilmiştir. Elde edilen dayanım değerleri sonucunda en yüksek dayanımı veren %3 oranı optimum KT miktarı olarak seçilmiştir. Benzer şekilde, AZ biyopolimeri için %0,5, %0,75, %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında testler gerçekleştirilmiş; sırasıyla 2,50 kg/cm², 2,57 kg/cm², 2,62 kg/cm², 2,58 kg/cm², 2,34 kg/cm², 2,29 kg/cm² ve 1,25 kg/cm² dayanım değerleri ölçülerek maksimum dayanımın elde edildiği %1 oranı optimum AZ olarak belirlenmiştir. Tek başına ulaşılan bu dayanım değerlerine kıyasla, hazırlanan %1 AZ + %3 KT kombine numunesi zemin dayanımını en üst seviyeye taşıyarak 3,39 kg/cm² SBD değerine ulaşmıştır. Katkı maddelerinin kür süresini belirlemek amacıyla, hazırlanan numuneler 1, 5, 10, 15 ve 25 gün süreyle desikatörde kürlenmiştir. Kür süreleri sonunda yapılan ölçümlerde sırasıyla 1,40 kg/cm², 3,39 kg/cm², 2,38 kg/cm², 2,10 kg/cm² ve 2,10 kg/cm² dayanım değerleri elde edilmiş, böylece maksimum mekanik performans 5 günlük kür süresinde elde edilmiştir [16].

2.2. Metot

Bu çalışmada, hem optimum katkı oranlarında KT ve AZ ile stabilize edilmiş numuneler hem de doğal kil zemin numuneleri üzerinde konsolidasyon deneyleri uygulanmıştır [15]. Bu yaklaşımın amacı, katkı maddelerinin zemin davranışı üzerindeki etkilerinin, doğal zemin ile karşılaştırmalı olarak nicel olarak değerlendirmektir. Deneylerde kullanılan konsolidasyon düzeneği Şekil 5'te gösterilmiştir. Konsolidasyon deneyleri, TS 1900-2 [17] standardı doğrultusunda yürütülmüş ve numuneler iç çapı 50 mm, yüksekliği 20 mm olan konsolidasyon ringlerinde hazırlanmıştır. Numuneler, kademeli olarak artırılan düşey gerilmeler altında 800 kPa'ya kadar yüklenmiş ardından zeminin şişme davranışının ve elastik deformasyonlarının incelenebilmesi amacıyla yine kademeli olarak boşaltma işlemi gerçekleştirilmiştir. Deney boyunca hem yükleme hem de boşaltma adımlarında zamana bağlı deformasyon ve boşluk değişimi kaydedilmiştir. Donma–çözülme davranışı için, laboratuvar ortamında numuneler belirlenen sıcaklık aralıklarında tekrarlanan çevrimlere tabi tutulmuştur. Numuneler standart konsolidasyon numuneleri gibi hazırlanmış sonrasında ise birkaç kat streç filme sarılarak donma-çözülme kabinin de döngüler gerçekleştirilmiştir [18]. Literatürde Othman ve Benson [19] tarafından yapılan deneysel çalışmada mevcut numuneden 24 kat daha büyük olan yalıtımsız standart kil numunelerinin (102x114 mm) çekirdek sıcaklığının ortam sıcaklığıyla dengelenmesi için yalnızca birkaç saatin yeterli olduğu belirtilmektedir. Bu doğrultuda, 5x2 cm boyutlarındaki numunelerin merkezine kadar kesintisiz ve homojen bir donma-çözülme döngüsü sağlamak amacıyla 3 saatlik donma ve 3 saatlik çözülme sürelerinin tam ısıl dengeyi sağlamada teorik ve deneysel olarak yeterli olacağı kabul edilmiştir. Çevrim sayısı 1, 3, 5 ve 10 olarak seçilmiş [20], böylece numuneler sırasıyla 6, 18, 30 ve 60 saat D-Ç işlemine maruz bırakılmıştır. Deneylerin tamamlanmasının ardından, elde edilen veriler kullanılarak yük–boşluk oranı (log(p)–e) eğrileri çizilmiş ve bu eğrilerden konsolidasyon katsayısı (C_v), hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) ve boşluk oranı (e) gibi temel konsolidasyon parametreleri hesaplanmıştır. Böylece hem katkı içeren hem de doğal numunelerin konsolidasyon davranışları nicel olarak karşılaştırılmış ve D-Ç çevrimleri sonrası KT ve AZ katkılarının zemin davranışına etkisi değerlendirilmiştir. Bu yöntem, katkı maddelerinin hem oturma kontrolü hem de D-Ç dayanımı üzerindeki etkilerinin sistematik olarak incelenmesini sağlamış ve zemin stabilizasyonu için önerilebilecek mühendislik uygulamalarına temel oluşturmuştur. Şekil 6'da konsolidasyona ait donma-çözülme numunelerine ait görseller sunulmuştur.



Şekil 5. Konsolidasyon deney düzeneği

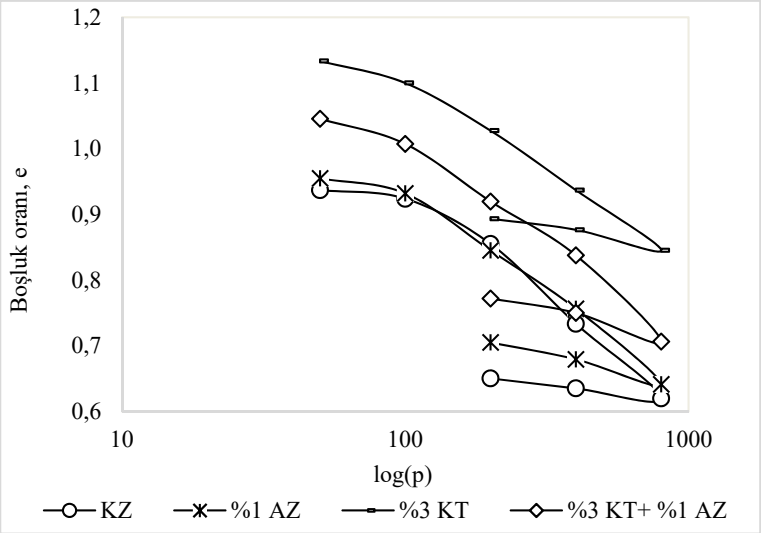


Şekil 6. Donma-çözülme konsolidasyon döngü süreci

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Katkılı Kil Zeminin Konsolidasyon Parametrelerinin Belirlenmesi

KZ ve optimum oranlarında malzeme içeren katkılı numunelerin konsolidasyon verileri elde etmek amacıyla konsolidasyon deneyleri yapılmış ve e-log(p) eğrileri elde edilmiştir (Şekil 7) [15].



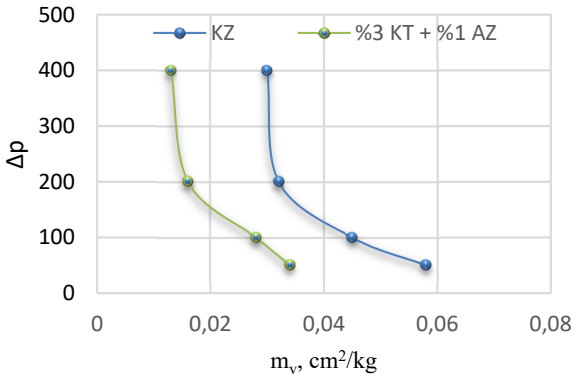
Şekil 7. Kil zemin, kiremit tozu, biyopolimer ve kombinasyon konsolidasyon eğrisi (e- $\log_p$)

Çizelge 2'de sunulan konsolidasyon katsayısı (C_v) ve Şekil 8'de verilen hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) değerleri incelendiğinde, katkı malzemelerinin kil zeminin mekanik ve deformasyon özellikleri üzerinde olumlu etki gösterdiği belirlenmiştir. Doğal kil zeminlerde düşük C_v değerleri, konsolidasyon hızının sınırlı olduğunu ve drenaj koşullarının yetersizliğini işaret etmektedir. Katkı malzemelerinin uygulanmasıyla C_v değerlerinde belirgin artışlar gözlenmiş; özellikle kiremit tozu katkısı, 100 kPa ve 800 kPa yükleme kademelerinde maksimum C_v değerleri sağlamış ve böylece konsolidasyon süresinin azaldığını göstermiştir. Akasya zamkı katkısı ise başlangıç yüklemeleri (50 kPa) altında yüksek C_v değerleri üretmiş olup, biyopolimerin düşük gerilmelerde zeminin geçirgenliğini artırıcı etkisini ortaya koymaktadır. %3 KT + %1 AZ kombinasyonu, özellikle 200–400 kPa aralığında en yüksek ve dengeli C_v değerlerini vererek orta yükleme kademelerinde konsolidasyon hızını optimize etmiştir.

Çizelge 2. KZ ve kombinasyonlara ait C_v değerleri(cm^2/dk)

Parametre	**Konsolidasyon katsayısı (C_v, cm^2/dk)**			
Kademeler	**KZ**	**KT**	**AZ**	**%3 KT + %1 AZ**
50	0,34	0,23	0,57	0,50
100	0,10	0,57	0,37	0,18
200	0,21	0,35	0,29	0,49
400	0,20	0,25	0,23	0,51
800	0,26	0,37	0,40	0,26

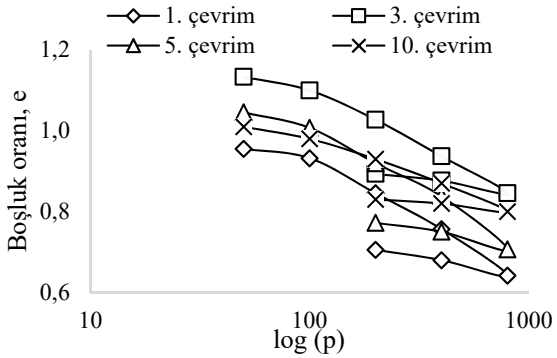
Hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) analizlerinde (Şekil 8), doğal kil zeminde yüksek m_v değerleri, zeminin yük altında yüksek sıkışabilirliğe sahip olduğunu göstermektedir. Katkı malzemelerinin uygulanmasıyla m_v değerlerinde sistematik bir azalma gözlenmiştir. Bu durum doğal halde hacimsel değişimlere hassasiyet gösteren zeminin katkı malzemesi eklenmesi ile hacimsel değişimlere karşı direncinin arttığını göstermektedir.



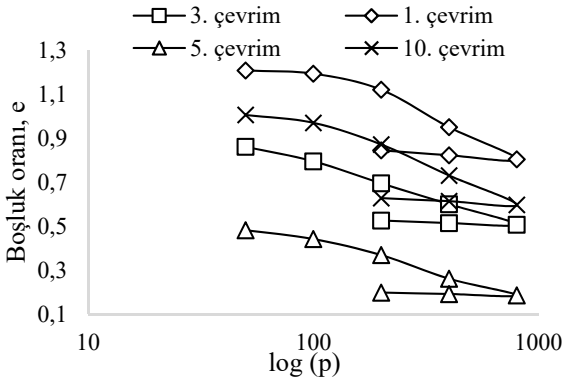
Şekil 8. KZ ve kombinasyona ait m_v değerleri

3.2. Kil Zemin ve Katkılı Zeminin Donma-Çözülme Konsolidasyon Davranışı

Kil zemin ve katkılı zemin numunelerine uygulanan konsolidasyon deneyleri sonrasında, mevsimsel değişimlerin etkisiyle ortaya çıkan donma-çözülme davranışını değerlendirmek amacıyla numuneler 1, 3, 5 ve 10 çevrim sayısına tabi tutulmuştur. Belirlenen döngü sayıları tamamlandıktan sonra, numuneler üzerinde konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çevrimsel döngülere karşılık gelen konsolidasyon eğrileri Şekil 9 ve Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 9. KZ'ye ait çevrimsel konsolidasyon eğrileri



Şekil 10. Optimum katkılı numunelerin çevrimsel konsolidasyon eğrileri

Konsolidasyon deneyinden sonra zeminin oturma davranışı açısından etkilerini görmek amacı ile konsolidasyon parametreleri olan C_v ve m_v değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 3.-4.-5.-6, Şekil 11 – Şekil 12). Donma–çözülme çevrimleri sonrası doğal kil zeminlerde konsolidasyon katsayısı değerleri düşük ve düzensiz bir dağılım sergilemiştir; bu durum gözenek yapısının bozulduğunu ve drenaj yollarının

etkinliğinin azaldığını göstermektedir. Yük artışı ile C_v değerlerinde genel bir azalma gözlenmiş olup, bu da yüksek yükler altında oturmaların daha uzun sürelerde gerçekleşeceğine işaret etmektedir.

Buna karşın katkılı zeminlerde C_v değerleri her yük kademesinde doğal zemine kıyasla daha yüksek bulunmuş ve özellikle düşük yüklerde belirgin bir artış göstermiştir. Bu durum, katkı malzemelerinin zemin içerisindeki parçacıklar arası bağları güçlendirerek D-Ç etkilerine karşı dayanıklılığı artırdığını ve boşluk suyu basıncının daha hızlı sönümlenmesini sağladığını göstermektedir.

Çizelge 3. C_v, cm^2/dk (1. döngü)

Parametre	Konsolidasyon katsayısı (C_v, cm^2/dk)	
Yükleme kademeleri	**KZ**	**%3 KT + %1 AZ**
50	0,32	0,46
100	0,24	0,20
200	0,23	0,34
400	0,24	0,26
800	0,29	0,31

Çizelge 4. C_v, cm^2/dk (3. döngü)

Parametre	Konsolidasyon katsayısı (C_v, cm^2/dk)	
Yükleme kademeleri	**KZ**	**%3 KT + %1 AZ**
50	0,30	0,37
100	0,24	0,33
200	0,33	0,30
400	0,19	0,27
800	0,26	0,25

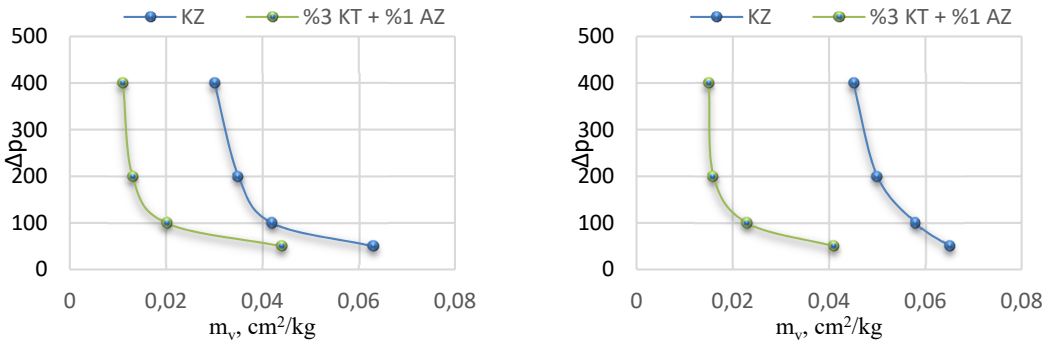
Çizelge 5. C_v, cm^2/dk (5. döngü)

Parametre	Konsolidasyon katsayısı (C_v, cm^2/dk)	
Yükleme kademeleri	**KZ**	**%3 KT + %1 AZ**
50	0,31	0,32
100	0,27	0,24
200	0,21	0,30
400	0,16	0,32
800	0,14	0,17

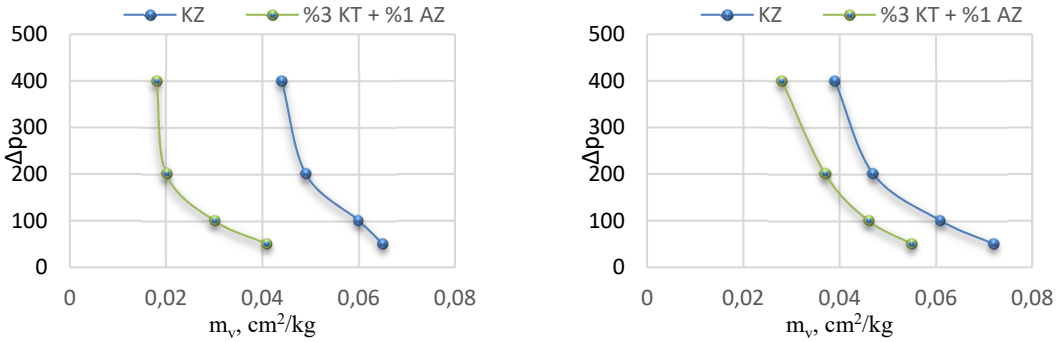
Çizelge 6. C_v, cm^2/dk (10. döngü)

Parametre	Konsolidasyon katsayısı (C_v, cm^2/dk)	
Yükleme kademeleri	**KZ**	**%3 KT + %1 AZ**
50	0,20	0,31
100	0,13	0,21
200	0,19	0,27
400	0,16	0,22
800	0,14	0,18

Donma–çözülme çevrimleri sonrası elde edilen veriler, doğal kil zeminlerde hacimsel sıkışma katsayısı değerlerinin oldukça yüksek seviyelere ulaştığını ve çevrim sayısının artışıyla birlikte bu değerlerde belirgin bir yükselme eğilimi gözlenmiştir (Şekil 11- Şekil 12). Bu durum, tekrar eden D-Ç etkilerinin zemin yapısında yol açtığı bozulmalar sonucunda gözenek düzeninin bozulduğunu ve zeminin yük altında daha fazla sıkışmaya eğilimli olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle 5. ve 10. çevrimler karşılaştırıldığında, doğal zeminde hacimsel sıkışma katsayısındaki artışın belirginleştiği ve dolayısıyla oturmaların daha uzun sürelerde ve daha büyük miktarlarda gerçekleşebileceği öngörülmektedir. Buna karşılık, katkı malzemeleri ile iyileştirilmiş zeminlerde m_v değerleri her yükleme kademesinde doğal zemine kıyasla anlamlı şekilde daha düşük seviyelerde kalmıştır. Bu gözlem, katkı malzemelerinin hacimsel sıkışma eğilimini azalttığını ve D-Ç döngülerinde karşılaşılabilecek oturma potansiyelini sınırlandırdığını göstermektedir. Çevrim sayısının artması ile katkılı zeminde m_v değerlerinde kısmi bir artış gözlense de doğal zemine kıyasla belirgin farkın korunması, iyileştirmenin çevrim sayısının artmasıyla D-Ç çevrimleri altında dahi etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 11. 1.-3. çevrim m_v katsayıları



Şekil 12. 5.-10. çevrim m_v katsayıları

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada yüksek plastisiteli kil zeminin konsolidasyon parametreleri, kiremit tozu ve akasya zamkı katkıları ile iyileştirilmiş hâliyle ve farklı donma–çözülme çevrimlerine maruz bırakılarak deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Konsolidasyon katsayısı değerleri doğal zeminde düşük ve düzensiz bir seyir göstermiş olup, bu durum boşluk suyu drenajının kısıtlı olduğunu ortaya koymaktadır. Katkı uygulanan zeminlerde ise C_v değerleri artış göstermiştir. Özellikle orta yükleme kademelerinde (200-400 kPa) doğal zeminde ortalama 0,20 cm²/dk ölçülen C_v değerleri, %3 KT + %1 AZ kombinasyonunda 0,50 cm²/dk seviyelerine ulaşarak konsolidasyon hızını yaklaşık %150 oranında artırmış ve zeminin drenaj kabiliyetini önemli ölçüde iyileştirmiştir.
- Hacimsel sıkışma katsayısı açısından doğal kil zeminde yüksek değerler elde edilmiş, bu da zeminin fazla oturma eğilimi gösterebileceğini işaret etmektedir. Katkı malzemelerinin uygulanması, zeminin oturma potansiyelini ciddi oranda düşürmüştür. Doğal zeminde ilk yükleme kademelerinde (50-100 kPa) 0,058 cm²/kg olan m_v değeri, KT+AZ kombinasyonu ile 0,033 cm²/kg seviyesine düşerek hacimsel değişimlerde yaklaşık %43 oranında bir azalma sağlamıştır. Yüksek gerilme kademelerinde ise doğal zeminin 0,030 cm²/kg olan m_v değeri, katkılı numunede 0,013 cm²/kg'a düşerek hacimsel değişimlerde %56'lık bir azalma gerçekleştirilmiştir.
- D-Ç çevrimleri sonrasında C_v değerleri doğal zeminde azalan bir seyir göstermiş olup, bu durum tekrarlı döngülerin gözenek yapısını bozarak boşluk suyu drenajını kısıtladığını ortaya koymaktadır. Katkı uygulanan zeminlerde ise çevrimsel bozulmaları sınırlandırılarak C_v değerlerinde katkısız zeminde elde edilen değerlere göre artış gözlenmiştir. Özellikle en kötü performans 10. çevrim sonrasında düşük yükleme kademesinde (50 kPa) doğal zeminde 0,20 cm²/dk ölçülen C_v değeri, %3 KT + %1 AZ kombinasyonunda 0,31 cm²/dk seviyelerine ulaşarak konsolidasyon hızını yaklaşık %55 oranında artırmıştır. Yüksek gerilme kademelerinde ise %29'luk bir iyileşme (0,14 cm²/dk'den 0,18 cm²/dk'ye) sağlayarak zeminin donma-çözülme koşullarındaki drenaj kabiliyetini önemli ölçüde korumuştur.

- D-Ç çevrimleri doğal kil zeminde gözenek yapısını bozarak hacimsel sıkışma değişimlerinde belirgin düşüş yaratmıştır. 10. çevrim sonunda doğal zeminin m_v değeri başlangıca göre artarak 0,072 cm²/kg'a ulaşırken, katkılı numunelerde bu değer çevrimsel bozulmalara rağmen 0,055 cm²/kg seviyesinde kalmıştır. Bu bulgu, D-Ç çevriminin ardından bile katkılı zeminin doğal zemine kıyasla yaklaşık %23 daha az sıkışabilirlik gösterdiğini ve D-Ç etkilerine karşı yapısal bütünlüğünü kısmen de olsa koruyabildiğini göstermektedir.
- Sonuç olarak, kiremit tozu ve akasya zamkı kombinasyonunun donma-çözülme durumunda konsolidasyon parametrelerini iyileştirmede alternatif malzemeler olabileceklerini göstermektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Javed, S.A. & Chakraborty, S. (2020). *Effects of waste glass powder on subgrade soil ımprovement.* World Scientific News, 30-42
2. Tunç, U., Bağrıaçık, B. ve Yıldız, A. (2021). Akasya zamkı (arabik gam) ile iyileştirilen nehir kumu ve geri dönüştürülmüş kumun mühendislik özelliklerinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36*(2), 571-579.
3. Güven, B., Günek, Ş. ve Kurt Albayrak, Z.N. (2023). Kilin mukavemeti ve donma-çözülme sonrası mukavemeti üzerinde biyopolimer ve lif katkısının ortak etkisinin araştırılması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26*(4), 951-961.
4. Orman, A. (2021). Düşük ve yüksek plastisiteli kil zeminlerde yüksek fırın cürufu, mermer tozu ve polipropilen fiberin zemin iyileştirilmesine katkısının incelenmesi. *Yüksek lisans tezi.* Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
5. Teber, D. ve Akoğuz, H. (2024). Kireç ve sodyum aljinat biyopolimeri ile iyileştirilen yüksek plastisiteli kil zeminin donma-çözülme özelliklerinin araştırılması. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 14*(3), 1371-1383.
6. Tunç, U., Bağrıaçık, B., Aslan, H., Altay, G. ve Şenol, A. (2022). Arabik gam katkılı doğal kil zeminin konsolidasyon sonuçlarının değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37*(3), 731-740.
7. Poyraz, S. ve Ural, N. (2022). Atık porselen karonun (APK) kil zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9*(2), 771-782.
8. Yılmaz, F. (2020). Uçucu kül ve mermer tozu katkılarının zeminin stabilizasyonuna ve donma-çözülmesine etkisinin araştırılması. *Academic Platform Journal of Engineering and Science, 8*, 56-61.
9. Aksoy, H. S. ve Yıldırım, A. (2023). PPF lifi ve PET talaşı ile güçlendirilmiş kaolin kilinin kayma mukavemetinin incelenmesi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 13*(2), 266-275.
10. Bağrıaçık, B. & Güner, E.D. (2020). An experimental investigation of reinforcement thickness of improved clay soil with drinking water treatment sludge as an additive. *KSCE Journal of Civil Engineering, 24*(12), 3619-3627.
11. Singh, A., Ratre, D., Shrisant, T., Kerketta, A., Chandrakar, D. & Garg, A.K. (2024). Utilization of waste rubber tyre in soil stabilization. *International Journal of Scientific Research in Engineering & Technology, 4*(2), 138-141.
12. Uçkaç, A.T., Rahat, E. ve Eskişar Tefçi, T. (2024). Atık cam katkılı bir zemin geopolimerizasyonu. *19. Ulusal Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Konferansı Bildiriler Kitabı,* 1-10. Ankara, Türkiye, Hacettepe Üniversitesi.
13. Chavan, P., Nawalkar, D., Pakhale, P., Khajone, K., Solanke, R., Dharpal, K. & Saraf, S. S. (2025). Stabilization of clayey soil by using wastes materials. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management (IJSREM), 9*(4), 1-9.
14. TS 1900-1. (2006). *İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini.* Türk Standardları Enstitüsü, 112, 99.
15. Özbahçeci Gökdeniz, İ. (2024). Donma-çözülme etkisi altındaki farklı katkılar ile iyileştirilen kil zeminlerin geoteknik açıdan değerlendirilmesi. *Yüksek lisans tezi.* Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
16. Özbahçeci Gökdeniz, İ. ve Bağrıaçık, B. (2024). Kiremit tozu ve biyopolimerle iyileştirilmiş kil zeminin mukavemet parametrelerinin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *39*(3), 771-784.
17. TS 1900-2. (2006). *İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini.* Türk Standartları Enstitüsü, 112, 64.

18. İbiş, N., Artuk, F., Zaimoğlu, A.Ş. ve Oltulu, M. (2025). Sıvılaştırılmış PET atıklarıyla iyileştirilen kil zeminlerin kıvam limitleri ve donma-çözülme davranışının incelenmesi. *Ege 14. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Konferansı Bildiri Kitabı,* 262-272.

19. Othman, M.A. & Benson, C.H. (1993). Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity and morphology of compacted clay. *Canadian Geotechnical Journal, 30*(2), 236-246.

20. Zaimoğlu, A.Ş., Hattatoğlu, F. ve Akbulut, R.K. (2013). Yüke maruz ince daneli zeminlerin donma-çözülme davranışı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19*(3), 117-120.