



Sentetik wollastonit katkısının yüksek plastisiteli kil zeminlerin dayanım ve mikroyapı özelliklerine etkisi

Effect of synthetic wollastonite on the strength and microstructural properties of high-plasticity clay soils

Firdevs Uysal¹ , Esra Tathoğlu^{2,*} , Hasan Erhan Yücel³

^{1,2} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

³ Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, 31060, Hatay, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, yüksek plastisiteli kil (CH) zeminlerin sentetik wollastonit (SV) katkısı ile stabilize edilerek mühendislik özelliklerindeki değişim deneysel olarak araştırılmıştır. Stabilizasyon amacıyla laboratuvar ortamında %25 Na-bentonit ve %75 kaolinit içeren yapay zemin hazırlanmış; %0, %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında SV katkısı ilave edilerek zemin numuneleri oluşturulmuştur. Zeminlerin kıvam limitleri ve serbest basınç dayanımı (UCS) belirlenmiş, katkının etkisi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca katkının mikroyapısal etkilerini incelemek amacıyla SEM ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel bulgular, SV katkısının plastisite indeksinde %33 oranında azalma sağladığını, UCS değerlerinde ise katkısız zemine göre %203'e varan artışa neden olduğunu göstermektedir. Mikroyapı analizleri, sentetik wollastonitin fiziksel özellikleriyle zemin davranışını olumlu yönde etkileyerek stabilize edici bir katkı malzemesi olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Atterberg limitleri, SEM-EDS, Sentetik wollastonit, Serbest basınç dayanımı, Yüksek plastisiteli kil, Zemin stabilizasyonu

1 Giriş

Zemin, mühendislik yapılarının güvenli, dayanıklı ve ekonomik bir şekilde inşa edilebilmesi açısından hem doğal bir yapı malzemesi hem de temel taşıyıcı ortam olarak kritik öneme sahiptir. Yapıların performansı büyük ölçüde oturduğu zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlıdır. Ancak çoğu durumda, zeminler doğal halleriyle bu yapısal gereksinimleri karşılamakta yetersiz kalmakta ve bu durum çeşitli geoteknik sorunlara yol açabilmektedir [1]. Bu bağlamda, zemin davranışının doğru şekilde analiz edilmesi ve gerektiğinde uygun mühendislik yöntemleriyle iyileştirilmesi, geoteknik mühendisliğin temel çalışma alanlarından birini oluşturmaktadır. Günümüzde zemin iyileştirme teknikleri, doğal zeminlerin taşıma gücünü artırmak, oturma miktarlarını azaltmak ve yapı ömrünü uzatmak amacıyla yaygın biçimde uygulanmaktadır ve modern inşaat uygulamalarının vazgeçilmez bir bileşeni haline gelmiştir [2,3]. Bu kapsamda uygulanan başlıca

Abstract

In this study, the effects of synthetic wollastonite (SV) on the engineering behavior of high-plasticity clay (CH) soils were experimentally investigated. For stabilization purposes, an artificial clayey soil composed of 25% Na-bentonite and 75% kaolinite was prepared in the laboratory, and synthetic wollastonite was added at varying dosages of 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, and 10% by weight. Atterberg limit tests and unconfined compressive strength (UCS) tests were conducted to evaluate the impact of SV addition. Furthermore, SEM and EDS analyses were performed to assess microstructural changes in the stabilized soils. The experimental results indicated that the plasticity index decreased by up to 33%, while UCS values increased by approximately 203% compared to the untreated soil. Microstructural analyses revealed that synthetic wollastonite positively influences the behavior of the soil through its physical characteristics, indicating its potential as an effective stabilizing additive.

Keywords: Atterberg limits, SEM-EDS, Synthetic wollastonite, Unconfined compressive strength, High plasticity clay, Soil stabilization

iyileştirme yöntemleri; mekanik sıkıştırma, geosentetik donatılarla güçlendirme, kolon tipi iyileştirmeler (taş kolon ve jet grout uygulamaları vb.), elektro-osmotik yöntemler ve kimyasal stabilizasyon gibi teknikleri içermektedir [4]. Bu yöntemlerin seçimi; zeminin özelliklerine, mühendislik yapısının gereksinimlerine, maliyet-etkinlik analizlerine ve çevresel koşullara bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [5]. Bu iyileştirme teknikleri içerisinde kimyasal stabilizasyon, özellikle ince daneli ve zayıf mühendislik özelliklerine sahip zeminlerin performansını artırmada etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır [6]. Bu yöntemde çimento, kireç, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu gibi bağlayıcı malzemeler zemine ilave edilerek, zamanla oluşan puzolanik ve/veya hidrolik reaksiyonlar sayesinde zemin matrisinde daha kararlı ve dayanıklı bir yapı elde edilmektedir [7]. Böylece, zeminin taşıma gücü artırılmakta, oturma potansiyeli azaltılmakta ve çevresel etkiler karşısında daha dirençli bir zemin yapısı oluşturulmaktadır [8,9].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: esratatlioglu@ohu.edu.tr (E. Tathoğlu)

Geliş / Received: 17.06.2025 Kabul / Accepted: 04.07.2025 Yayınlanma / Published: 15.07.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1721159

Son yıllarda, geleneksel bağlayıcı malzemelerin (çimento, kireç, uçucu kül vb.) çevresel etkileri ve sürdürülebilirlik kaygıları, araştırmacıları daha çevre dostu ve yenilikçi alternatif arayışlarına yönlendirmiştir [10]. Bu doğrultuda, doğal ya da sentetik kökenli alternatif katkı malzemelerinin zemin stabilizasyonunda kullanımına yönelik çalışmalar giderek artmakta ve bu alanda dikkat çeken bir araştırma eğilimi oluşmaktadır [11,12]. Bu kapsamda öne çıkan mineral katkılardan biri de vollastonittir. Geleneksel olarak seramik ve boya sanayilerinde kullanılan bu mineral, son yıllarda zemin mühendisliğinde de araştırma konusu haline gelmiştir [13].

Kalsiyum silikat esaslı kimyasal yapısı sayesinde bağlayıcı nitelikler gösterebilen vollastonit, zemin stabilizasyonunda potansiyel bir iyileştirici olarak değerlendirilmektedir [14]. Vollastonit, düşük toksisite, biyolojik olarak parçalanabilirlik ve yüksek kimyasal dayanıklılık gibi çevresel ve mühendislik açısından avantajlı özelliklere sahiptir [15,16]. Vollastonit, doğal yataklardan elde edilebilmenin yanı sıra, endüstriyel atıkların kullanılması ile laboratuvar ortamında sentetik olarak da üretilmektedir [17-19]. Doğal vollastonit kaynaklarının kısıtlı olması, sentetik vollastoniti çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik açıdan önemli bir alternatif haline getirirken, bu malzemenin zeminlerin mühendislik davranışları üzerindeki etkilerine dair çalışmaların literatürde sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, doğal vollastonit katkılı zemin stabilizasyonu üzerine yapılan çalışmalar, bu malzemenin zemin özelliklerini iyileştirme potansiyelini ortaya koymaktadır [13,20-22]. Mohanakshmi vd. [13], vollastonit katkısının zeminler üzerindeki etkilerini Standart Proktor sıkıştırma ve Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) testleri gibi çeşitli laboratuvar deneyleriyle incelemiş; %15'e kadar olan katkı oranlarında zemin dayanımında belirgin artışlar gözlemlerken, bu oranın üzerindeki katkılarda artışın azaldığını belirtmiştir. Benzer şekilde, Nikhil vd. [20], doğal vollastonit kullanarak şişen zeminlerin stabilizasyonuna yönelik yaptıkları çalışmada, katkı oranındaki artışla birlikte serbest basınç dayanımı değerlerinin %12.5'e kadar yükseldiğini, ancak %15 katkı oranından itibaren azalmaya başladığını tespit etmişlerdir. Aynı çalışmada, maksimum kuru yoğunluğun azaldığı, optimum su içeriğinin ise arttığı belirtilmiş; bu durum, katkı maddesinin zemin malzemesinden daha yüksek özgül ağırlığa sahip olmasıyla açıklanmıştır. Kumar vd. [21], vollastonit tozunu parçalanmış plastik atıklarla birlikte kullanarak karma katkı sistemlerinin etkisini incelemiştir. %0.5 oranında plastik ve %5, %10, %15 ile %20 oranlarında vollastonit tozu içeren karışımlar üzerinde yapılan deneyler sonucunda; katkı oranı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlık ve CBR değerlerinde artış, optimum su içeriğinde ise azalma gözlemlenmiştir. Çalışmada en etkili katkı oranı %20 olarak belirlenmiştir. Pouraziz vd. [22], örselenmiş kil zemine %2, %4, %8 ve %10 oranlarında vollastonit ilave ederek gerçekleştirdikleri çalışmada, vollastonitin zemin davranışları üzerindeki en etkili katkı oranının %8 olduğunu ortaya koymuşlardır.

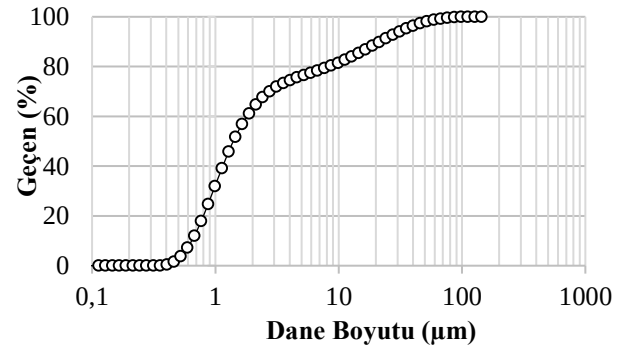
Bu çalışmada, laboratuvar ortamında hazırlanan yüksek plastisiteli kil (CH) zemine farklı oranlarda (%0, %2, %4,

%6, %8 ve %10) sentetik vollastonit (SV) katkısı ilave edilerek zemin stabilizasyonu gerçekleştirilmiştir. Stabilizasyonun zeminin mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri; Atterberg limitleri, serbest basınç dayanımı (UCS) ve mikroyapı karakterizasyonuna yönelik SEM-EDS analizleri ile değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, SV katkısının hem mekanik hem de mikroyapısal düzeyde zemine sağladığı iyileştirmeleri ortaya koymaktır.

2 Malzeme özellikleri

2.1 Zemin özellikleri

Bu çalışmada, SV katkısı ile stabilize edilecek ince daneli zemin ağırlıkça %25 oranında sodyum bentonit (Na-bentonit) ve %75 oranında kaolinit içerecek şekilde yapay olarak hazırlanmıştır. Bu zeminin yapay olarak hazırlanmasındaki amaç; zayıf zemin davranışını temsil eden, homojen ve tekrarlanabilir özelliklere sahip bir numune elde ederek katkı olarak kullanılan vollastonitin etkilerini kontrollü koşullar altında değerlendirmektir. İnce daneli zeminin likit limit değeri (LL) BS 1377-2 [23] standardına göre %106, plastik limit değeri (PL) ASTM D 4318 [24] standardına göre %24 olarak tespit edilerek plastisite indisi (PI) %82 olarak tespit edilmiştir. Bu zemin, USCS'ye göre CH olarak sınıflandırılmıştır. Zeminin dane çapı dağılımı, lazer kırınım yöntemi ile tespit edilerek Şekil 1'de verilmiştir. Ayrıca, Na-bentonit, kaolinit ve yapay olarak oluşturulan zeminin kimyasal içeriğinin tespiti için XRF (X-Ray Fluorescence) analizleri yapılmıştır (Tablo 1).



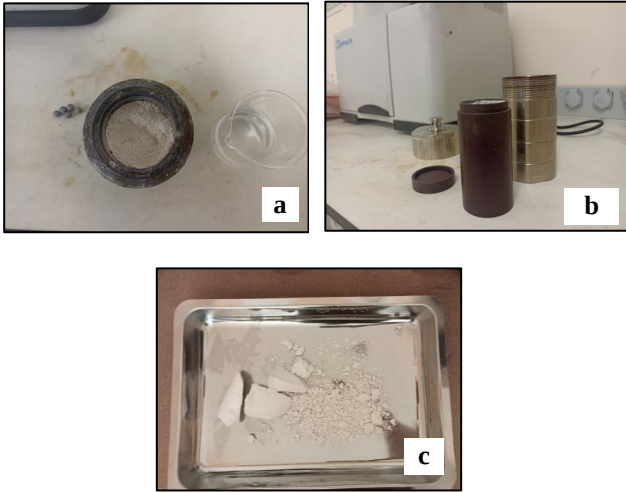
Şekil 1. Zeminin dane çapı dağılımı

Tablo 1. Zemin ve bileşenlerinin kimyasal içeriği

Oksit	Na-bentonit (%)	Kaolinit (%)	Zemin (%)
SiO ₂	63.710	79.620	76.190
Al ₂ O ₃	18.820	15.880	16.210
Fe ₂ O ₃	4.910	0.645	1.620
CaO	4.340	1.795	2.530
MgO	2.205	0.318	0.720
K ₂ O	1.375	0.397	0.659
TiO ₂	0.439	0.287	0.345
SO ₃	0.053	0.149	0.137
Mn ₃ O ₄	0.129	0.006	0.041
Na ₂ O	2.799	0.062	0.640
BaO	0.091	0.081	0.080
P ₂ O ₅	0.190	0.083	0.108
SrO	0.040	0.035	0.120

2.2 Sentetik vollastonit üretimi ve özellikleri

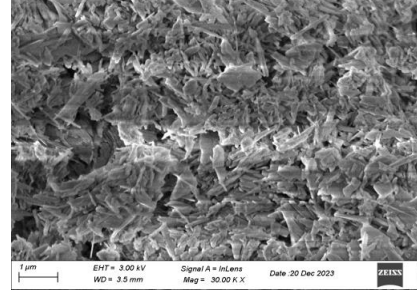
Sentetik vollastonit üretimi üç temel aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar, mekanokimyasal süreç, hidrotermal süreç ve sinterleme süreci olarak adlandırılmıştır. Üretimde ham madde olarak sönmemiş kireç (CaO) ve kuvars kumu (SiO₂) kullanılmıştır. Öncelikle, CaO ve SiO₂ mol ağırlıklarına göre 1:1 mol oranında olacak şekilde katı malzeme ve su/katı oranı 1 olacak şekilde saf su ile **Şekil 2a**'da görüldüğü gibi bilyalı değirmenin haznesine yerleştirilmiştir. Bilyalı değirmen 30 dakika boyunca 250 rpm hızda çalıştırılarak homojen bir karışım elde edilmiştir. Üretim aşamasının bu kısmı mekanokimyasal süreç olarak adlandırılmıştır. Bu aşamadan sonra elde edilen karışım **Şekil 2b**'de görüldüğü gibi kahverengi bir teflonun içerisine alınarak teflon çelik otoklavın içerisine yerleştirilmiştir. Bu otoklav, 2 gün boyunca 200°C'de bir fırında bekletilmiştir. Hidrotermal süreç olarak açıklanan bu aşamada otoklav tekniği, nem, basınç ve sıcaklıkla daha iyi bir kristal yapı oluşumunu sağlamaktadır. 48 saatin sonunda, otoklav fırından çıkarılarak oda sıcaklığına ulaşınca kadar dışarıda tutulmuştur. Otoklavdan çıkarılan numune, **Şekil 2c**'de gösterilen tobermorit mineralidir. Elde edilen tobermorit, halkalı değirmende öğütülerek 425µm kare gözlü 40 numaralı elekten elenmiştir. Eleme işleminden sonra elde edilen malzeme, 1000°C'de 1 saat boyunca yüksek sıcaklık fırınında bekletilerek sinterleme süreci tamamlanmıştır. Sinterleme sonrasında SV minerali (CaSiO₃) elde edilmiştir.



Şekil 2. Sentetik vollastonit üretim prosedürü

SV üretim prosedüründeki süre ve sıcaklıklar belirlenirken öncelikle farklı değerler seçilmiş ve deneme üretimleri yapılarak elde edilen sentetik vollastonitler incelenmiştir. Örneğin, hidrotermal süreç 1 gün, 2 gün ve 3 gün olarak uygulanmış, ayrıca sinterleme işlemindeki sıcaklık 1000°C, 1100°C ve 1200°C olarak denenmiştir. Elde edilen bütün SV'ler SEM analizine tabi tutulup en yoğun ve en belirgin iğnemsî parçacık yapısına sahip olan SV prosedürü deneylerde kullanılacak olan SV'nin üretiminde kullanılmıştır. Elde edilen SV mineraline XRF, SEM ve dane boyut dağılımı analizleri yapılmıştır. XRF analizi neticesinde üretilen SV'nin CaO ve SiO₂ içeriğinin sırasıyla %44.8 ve %50.9 olduğu belirlenmiştir. Üretilen

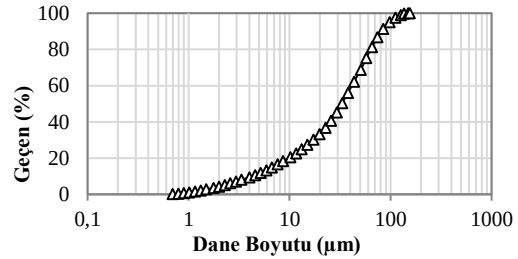
SV'nin SEM analizi sonucu alınan görüntüsü **Şekil 3**'te görülmekte olup, buna göre elde edilen SV'nin iğnemsî parçacık yapısına sahip olduğu kanıtlanmıştır. Son olarak, yapılan dane boyut dağılımı analizi **Şekil 4**'te verilmiştir. Bu analiz sonucuna göre SV'nin tane boyutunun yaklaşık 0-150µm seviyesinde olduğu bulunmuştur.



Şekil 3. Sentetik vollastonitin SEM görüntüsü

3 Deneysel çalışmalar ve sonuçları

Bu çalışmada, laboratuvar ortamında sentetik olarak hazırlanan yüksek plastisiteli kil (CH) zemine, farklı oranlarda (%0, %2, %4, %6, %8 ve %10) SV katkısı ilave edilerek stabilize edilmiş zemin numuneleri hazırlanmıştır. Deneysel programın ilk aşamasında, katkı uygulanmış zeminlerin temel mühendislik özellikleri incelenmiştir. İkinci aşamada, serbest basınç deneyi için üretilecek numunelerde kullanılacak optimum su muhtevası, Standart Proktor deneyi ile belirlenmiştir. Son aşamada ise, elde edilen optimum su içeriği kullanılarak farklı vollastonit oranlarında hazırlanan zemin numunelerine serbest basınç deneyleri uygulanmış ve bu sayede katkı oranlarının serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.



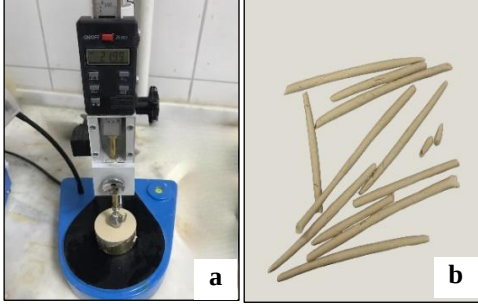
Şekil 4. Sentetik vollastonitin dane boyutu dağılımı

3.1 Deneysel çalışmalar

Kıvam limit deneyleri, vollastonit katkılı CH zemin numunelerinin likit limit ve plastik limit değerlerinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Numunelerin likit limit değerleri BS 1377-2 [23] standartlarına uygun olarak yarı otomatik düşen koni deneyi ile elde edilmiştir (**Şekil 5a**). Plastik limit deneyi, likit limit için hazırlanan numunelerden bir miktar alınarak, ASTM D 4318 [24] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir (**Şekil 5b**).

Standart Proktor deneyi, CH zeminin optimum su içeriği ile maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinin tespit edilmesi amacıyla yapılmıştır. Deney ASTM D698-78A [25] standardına uygun olarak otomatik proktor sıkıştırıcısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (**Şekil 6**). Kompaksiyon

deneyi sonucuna göre yapay zeminin optimum su içeriği (w_{opt}) %32, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri (γ_{kmaks}) 14,25 kN/m³ olarak elde edilmiştir.



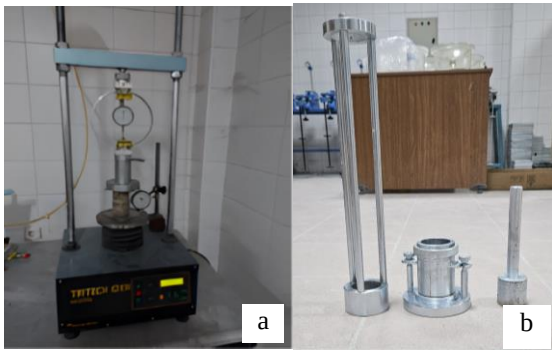
Şekil 5. Kıvam limitleri deneyleri; düşen koni deneyi (a), plastik limit deneyi (b)



Şekil 6. Otomatik proktor sıkıştırıcısı

Serbest basınç deneyleri (UCS) zemin stabilizasyon performansının araştırılmasında kullanılan en yaygın deneylerdendir. Bu çalışmada yapılan UCS deneyleri ASTM D 2166 [26] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 7a).

Deney numuneleri, önceki aşamada standart proktor deneyleri ile elde edilen w_{opt} kullanılarak γ_k elde edilecek şekilde hazırlanmıştır. Numuneler içi yağlanmış, 50mm çap ve 100mm yüksekliğe sahip silindirik rijit mold içinde hazırlanmıştır (Şekil 7b). Numuneler üç tabaka olacak şekilde, ağırlığın sabit yükseklikten düşürülmesi ile sıkıştırılmıştır.



Şekil 7. Serbest basınç deneyi (a); numune hazırlama kalıbı (b)

3.2 Deney sonuçları

Kıvam limitleri deneyleri

Zeminin plastisite özelliklerindeki değişimi değerlendirmek amacıyla, Atterberg limitleri yapılarak likit limit ve plastisite indeksi (PI) değerleri belirlenmiş ve elde edilen veriler plastisite kartı üzerinde gösterilmiştir (Şekil 8).

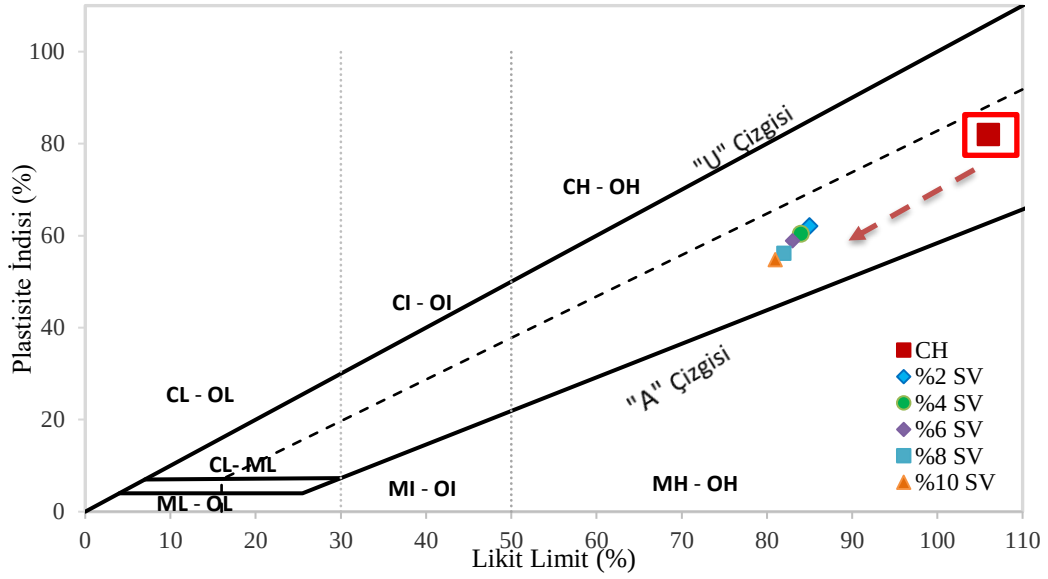
Bu grafik, vollastonit katkısının farklı oranlarda (%0, %2, %4, %6, %8 ve %10) ilave edildiği zemin karışımları üzerinde yapılan kıvam limitleri deneyleri sonucunda elde edilmiştir. Katkı oranlarına bağlı olarak zeminin kıvam sınırlarında meydana gelen değişimler değerlendirilmiş, katkı maddesinin plastisite davranışı üzerindeki etkisi grafiksel olarak ortaya konmuştur. Böylece, vollastonit ilavesinin zeminin mühendislik sınıfı üzerindeki etkisi görsel olarak analiz edilmiştir.

Yapay olarak oluşturulan zeminin, plastisite kartında yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfında yer aldığı görülmektedir. Vollastonit katkı oranının %2'den %10'a kadar artırılmasıyla birlikte, zemin örneklerinin plastisite özelliklerinde belirgin değişimler meydana gelmiştir. Katkı oranındaki artışa paralel olarak plastisite indeksi değerlerinde azalma yaşanmış, likit limit değerleri ise yüksek seviyelerde kalmaya devam etmiştir. Bu durum, katkı maddesinin killi matris içerisindeki suyun dağılımını etkileyerek zeminin plastik davranışını sınırladığını göstermektedir. Her ne kadar tüm katkı oranlarında zemin CH sınıfı içerisinde yer almaya devam etse de, özellikle %10 katkı oranında plastisite indeksinin "A" çizgisine yaklaşması, vollastonit katkısının zeminin kıvam limitleri üzerindeki olumlu etkisini ortaya koymaktadır.

Serbest basınç deneyleri

VS katkısının zeminlerin dayanım özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, katkı oranları %2'den %10'a kadar değişen CH tipi zemin numuneleri üzerinde UCS deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler, vollastonit katkısının CH sınıfı zeminlerin dayanım özelliklerini anlamlı düzeyde artırdığını göstermekte; katkısız numunelere kıyasla, katkı uygulanan zeminlerde hem gerilme dayanımı hem de deformasyon kapasitesinde dikkate değer gelişmeler sağlandığı anlaşılmaktadır (Şekil 9). Katkısız referans numunenin serbest basınç dayanımı 217.63kPa bulunmuştur. Katkı oranı arttıkça, eksenel dayanım değerlerinde anlamlı bir artış meydana gelmiştir.

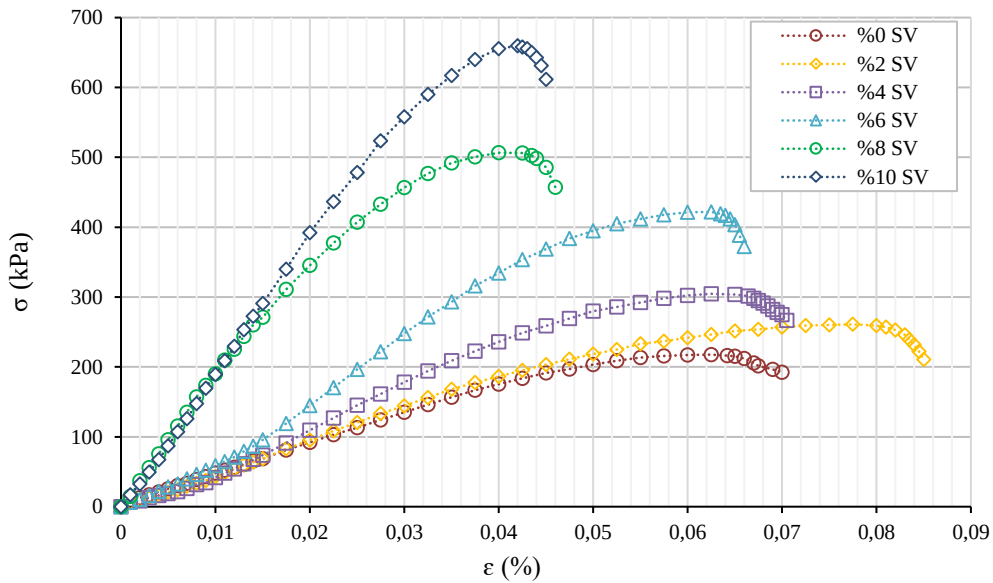
Özellikle %6 ve %8 vollastonit katkı oranlarında, dayanımın sırasıyla 421,9kPa ve 506.48kPa'ya yükseldiği görülmektedir. Bu oranlarda dayanımın yanı sıra şekil değiştirme kapasitesinde de dikkate değer bir artış sağlanmıştır. En yüksek değer ise %10 vollastonit katkısı ile sağlanmış olup, serbest basınç dayanımı 659.58kPa olarak tespit edilmiştir; bu da katkısız numuneye kıyasla %200'e yakın bir artışa karşılık gelmektedir.



Şekil 8. Vollaştonit katkılı zeminlerin plastisite diyagramı üzerindeki dağılımı

Eğrilerin şekil değiştirmeleri ve tepe noktalarının yerleri, katkı oranı arttıkça zemin davranışında bir miktar daha kırılma ve daha ani dayanım kaybı yaşanabileceğine işaret etmektedir. Özellikle %10 katkılı karışımda eğrinin dik olması, yüksek katkı oranlarının deformasyon sünekliğini sınırlandırabileceğini düşündürmektedir. Bu eğilim, literatürde doğal vollaştonit katkı kullanılan çalışmalar ile büyük ölçüde örtüşmektedir. Mohanakshmi vd. [13] ve Nikhil vd. [20], vollaştonit katkısının zemin stabilizasyonundaki etkinliğinin genellikle %10–15 aralığında olduğunu; ancak bu seviyenin üzerindeki katkı oranlarında performansın doygunlaştığını veya azalmaya başladığını belirtmişlerdir. Benzer şekilde, Pouraziz vd. [22] de %8 oranındaki katkının, zeminin plastisite ve dayanım özellikleri açısından optimum seviye olduğunu vurgulamıştır. Bu çalışmada elde edilen bulgular

da literatürle uyumlu olup, özellikle yüksek katkı oranlarında (örneğin %10) eksenel dayanım artsa da, eğrinin dik formu deformasyon kapasitesinde azalmaya ve kırılma davranışa işaret etmektedir. Bu durum, katkı oranı ile dayanım arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığını göstermekte ve stabilizasyon performansının yalnızca maksimum dayanım üzerinden değil, aynı zamanda süneklik, şekil değiştirme kapasitesi ve kırılma davranışı gibi parametrelerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, vollaştonit katkısının CH tipi zeminlerde %6–%10 katkı aralığında optimum stabilizasyon sağladığı; bu oranların hem dayanım artışı hem de işlenebilirlik ve deformasyon davranışında anlamlı iyileşmeler oluşturduğu sonucuna varılabilir.



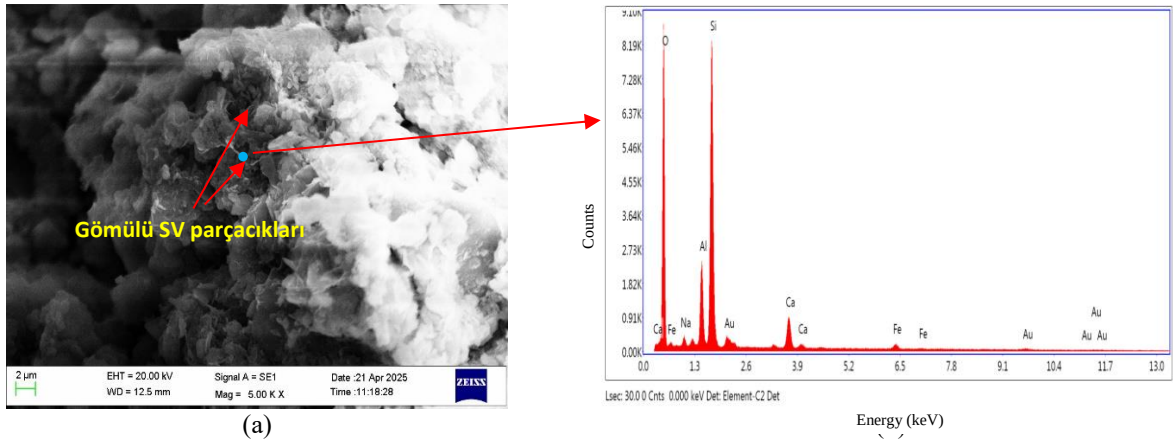
Şekil 9. Farklı vollaştonit oranlarında stabilize edilen zeminlerin gerilme–şekil değiştirme davranışı

Mikro yapıdaki değişimin araştırılması

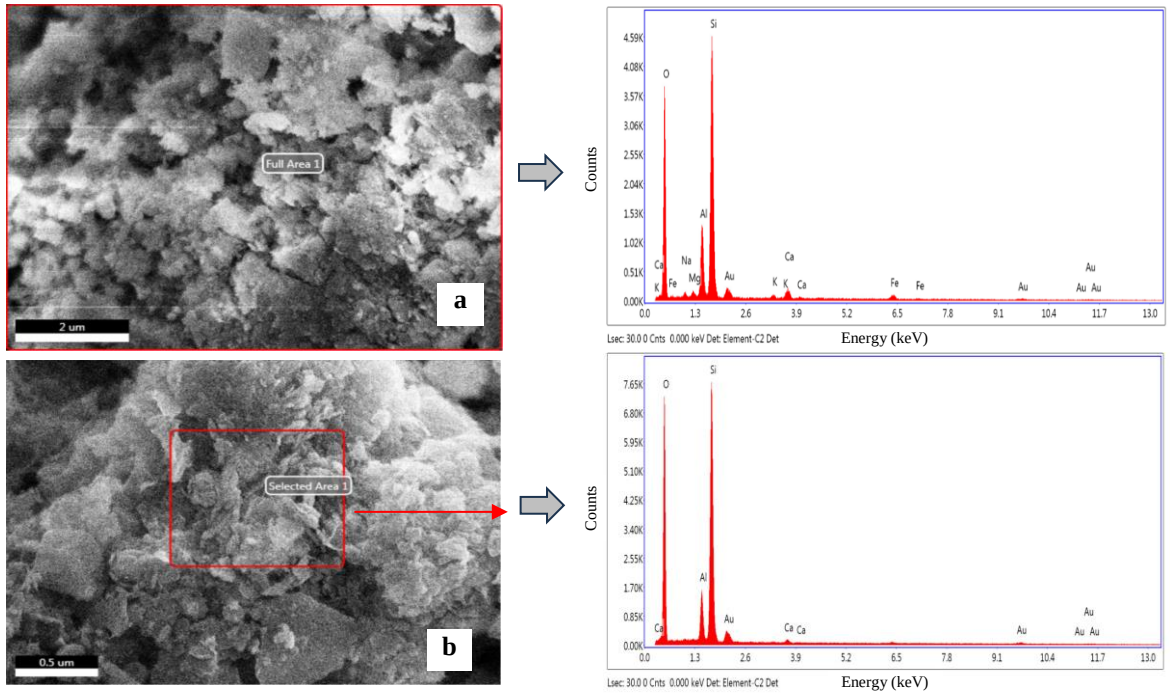
İnert yapıya sahip olan sentetik vollastonit karışımlarda iğnemi parçacık yapısı sayesinde mikro lif gibi davranmaktadır ve bu sayede karışımların mekanik özelliklerinde belli ölçüde iyileştirme sağladığı bilinmektedir [18, 27, 28]. Şekil 10'da görülen SEM-EDAX analizi sonucu incelendiğinde gömülü halde mevcut olan sentetik vollastonik parçacıkları görülmektedir. Bu parçacıklar, karakteristik iğnemi ve inert yapılarıyla zemin içinde mikro lifler gibi davranmakta ve matrise mekanik bağ kuvveti sağlamaktadır. SEM görüntüsüne eşlik eden EDS spektrumunda ise belirgin silisyum (Si) ve kalsiyum (Ca) piklerinin varlığı, SV parçacıklarının kimyasal bileşimini doğrulamakta ve bu katkının zeminle fiziksel teması

sayesinde olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, SV'nin stabilize zemine katkısının fiziksel dolgu sağlamakta ve mikrolif gibi davranmasıyla sağladığını göstermektedir.

Şekil 11'de kontrol karışımına ve %8 oranında SV katkısı içeren stabilize zemine ait SEM görüntüsü ve ilgili bölgenin EDS analizi sunulmaktadır. SEM görüntüsünde, SV katkısının zemin matrisi içerisinde yoğunlaştığı bölgeler belirgin şekilde görülmekte olup, bu bölgelerdeki iğnemi yapılar SV'nin karakteristik morfolojisine işaret etmektedir. Bu yapı, zemin matrisine daha fazla temas yüzeyi sunarak mikro mekanik kilitlenmeyi artırmakta ve böylece zemin-SV arayüzündeki bağ kuvvetinin gelişimine katkı sağlamaktadır.



Şekil. 10 Gömülü SV parçacıklarının SEM görüntüsü (a), ilgili noktanın EDS spektrumu (b)



Şekil. 11 Mikroyapı ve EDS analizi: kontrol numunesi (a); %8 SV katkılı stabilize zemin (b)

Gözlemlenen homojen dağılım, SV parçacıklarının karışım içerisinde iyi bir şekilde yayılmış olduğunu göstermektedir. EDS analizi, bu gözlemleri kimyasal düzeyde desteklemektedir. Özellikle %8 oranında SV katkısı içeren stabilize zemine ait EDS analizindeki silisyum (Si) ve kalsiyum (Ca) elementlerine ait piklerin, kontrol karışımına kıyasla belirgin şekilde artmış olması, katkı miktarındaki artışın mikroyapıdaki kimyasal içeriği doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır. SV katkı oranının artmasıyla Si ve Ca konsantrasyonlarındaki yükselme, SV'nin inert yapısının stabilize zemin içerisindeki etkinliğini artırdığına işaret etmekte; bu durum, mekanik özelliklerde gözlenen iyileşmelerin temel nedenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, laboratuvar ortamında oluşturulan yüksek plastisiteli CH tipi bir zemin, farklı oranlarda (%0, %2, %4, %6, %8 ve %10) SV katkısı ile stabilize edilerek, zemin özelliklerinde meydana gelen değişimler sistematik olarak incelenmiştir. Kıvam limitleri, kompaksiyon ve serbest basınç dayanımı gibi temel deneylerin yanı sıra SEM ve EDS analizleriyle mikroyapısal değişimler de değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, SV katkısının hem mekanik hem de mikroyapısal düzeyde zeminin performansını iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Çalışma sonucunda ulaşılan başlıca bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- SV katkısı ile plastisite özellikleri önemli ölçüde değişmiş, katkı oranının artmasıyla birlikte plastisite indisi (PI) %33'e varan oranda azalmıştır. Bu durum, zeminin daha az şekil değiştiren ve daha kararlı bir yapı kazandığını göstermektedir.
- Katkının en yüksek olduğu %10 SV oranında, likit limit değeri katkısız zemine göre %23.5 oranında düşüş göstermiştir; buna karşılık plastik limitin belirli oranlardan sonra artış eğilimine girmesi, SV katkısının zeminin kıvam davranışında olumlu etkiler yarattığını ortaya koymuştur.
- Serbest basınç dayanımı (UCS) değerleri, katkı miktarına bağlı olarak belirgin şekilde artmış; katkısız zemin 217.63 kPa dayanım gösterirken, %10 SV katkılı numunede bu değer 659.58 kPa olarak ölçülmüş ve yaklaşık %203 oranında artış elde edilmiştir.
- Vollastonit katkısı, zeminlerin dayanım ve şekil değiştirme özelliklerinde genel bir iyileşme sağlarken; katkı oranı arttıkça bazı numunelerde kırılma davranış eğiliminin artması, yüksek oranlarda ani dayanım kayıplarının oluşabileceğini ortaya koymaktadır.
- SEM görüntüleri, SV'nin iğnemi morfolojisi sayesinde mikro lif gibi davrandığını ve çatlak ilerlemesini sınırladığını göstermiştir.
- SV'nin doğal kaynaklarının sınırlı olması, laboratuvar ortamında üretimini önemli hale getirmektedir. Bu şekilde elde edilen malzemenin bağlayıcı katkı olarak kullanılabilmesi, çevresel

sürdürülebilirlik açısından olumlu bir alternatif sunmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %12

Kaynaklar

- [1] K. Terzaghi, R. B. Peck and G. Mesri, Soil mechanics in engineering practice. John Wiley & Sons, 1996.
- [2] U. Zada, A. Jamal, M. Iqbal, S. M. Eldin, M. Almoshaogeh, S. R. Bekkouche and S. Almuaythir, Recent advances in expansive soil stabilization using admixtures: current challenges and opportunities. Case Studies in Construction Materials, vol. 18, e01985, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01985>.
- [3] A. Kumar and S. Sinha, Machine learning-based hybrid regularization techniques for predicting unconfined compressive strength of soil reinforced with multiple additives. Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design, 8, 228, 2025. <https://doi.org/10.1007/s41939-025-00831-1>.
- [4] G. A. Archibong, E. U. Sunday, J. C. Akudike, O. C. Okeke and C. Amadi, A review of the principles and methods of soil stabilization. International Journal of Advanced Academic Research | Sciences, Technology and Engineering, 6(3), 89-115, 2020.
- [5] A. M. S. N. Abeyasinghe, L. C. Kurukulasuriya and M. C. M. Nasvi, A comparative assessment of geotechnical performance, cost and carbon footprint of expansive soil treated with cement, lime and fly ash. Geomechanics and Geoengineering, 1-19, 2025. <https://doi.org/10.1080/17486025.2025.2477487>.
- [6] J. A. Shagiwal, Çimento ile stabilize edilmiş yumuşak killi zeminlerde zeolit ve polipropilen elyaf ilavesinin etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın, 72, 2023.
- [7] D. Barman and S. K. Dash, Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 14(4), 1319-1342, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.02.011>.
- [8] L. C. Dang, H. Khabbaz and B. J. Ni, Improving engineering characteristics of expansive soils using industry waste as a sustainable application for reuse of bagasse ash. Transportation Geotechnics, 31, 100637, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100637>.
- [9] A. A. M. S. Mohamed, J. Yuan, M. Al-Ajamee, Y. Dong, Y. Ren and T. Hakuzweyezu, Improvement of expansive soil characteristics stabilized with sawdust ash, high calcium fly ash and cement. Case Studies in Construction Materials, 18, e01894, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01894>.
- [10] J. L. Díaz-López, J. Rosales, F. Agrela, M. Cabrera and G. M. Cuenca-Moyano, Evaluation of geotechnical, mineralogical and environmental properties of clayey soil stabilized with different industrial by-products: A

- comparative study. *Construction and Building Materials*, 449, 138497, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138497>.
- [11] M. Hanafi, S. Bordoloi, V. Rinta-Hiiro, T. Oey and L. Korkiala-Tanttu, Feasibility of biochar for low-emission soft clay stabilization using CO₂ curing. *Transportation Geotechnics*, vol. 49, 101370, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101370>.
- [12] Y. Bai, A. Arulrajah, S. Horpibulsuk and A. Zhou, Geopolymer stabilization of carbon-negative gasified olive stone biochar as a subgrade construction material. *Construction and Building Materials*, 442, 137617, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137617>.
- [13] V. Mohanalakshmi, V. M. Adhithiyan, R. J. Kumar and L. A. Preethi, Geotechnical properties of soil stabilized with wollastonite. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 5(3), 703-706, 2016.
- [14] A. Maindkar, A. Dhatrik, S. Thakare and P. Kolhe, Effect of powder of wollastonite on soil stabilization: A review. *Journal of Ceramics and Concrete Technology*, 8, 1-11, 2023.
- [15] L. D. Maxim and E. E. McConnell, A review of the toxicology and epidemiology of wollastonite. *Inhalation Toxicology*, 17(9), 451-466, 2005. <https://doi.org/10.1080/08958370591002030>.
- [16] L. D. Maxim, R. Niebo, M. J. Utell, E. E. McConnell, S. LaRosa and A. M. Segrave, Wollastonite toxicity: an update. *Inhalation Toxicology*, 26(2), 95-112, 2014. <https://doi.org/10.3109/08958378.2013.857372>.
- [17] M. M. Obeid, Crystallization of synthetic wollastonite prepared from local raw materials. *International Journal of Materials Chemistry*, 4(4), 79-87, 2014.
- [18] H. E. Yücel and S. Özcan, Strength characteristics and microstructural properties of cement mortars incorporating synthetic wollastonite produced with a new technique. *Construction and Building Materials*, 223, 165-176, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.195>.
- [19] H. H. Abo-Elmaged, R. E. Ngida, N. A. Ajiba, H. E. H. Sadek and R. M. Khattab, Utilization of industrial waste materials for the preparation of wollastonite by temperature-induced forming technique. *Scientific Reports*, 14(1), 21752, 2024.
- [20] P. S. Nikhil, P. T. Ravichandran and K. D. Krishnan, Stabilisation and characterisation of soil using wollastonite powder. *Materials Today: Proceedings*, 40 S161-S166, 2021.
- [21] M. S. K. Kumar, A. Amati, A. C. Bhavana, K. M. K. Naik and A. Sushma, Assessment of BC soil performance using wollastonite & plastic shredded as a supplement. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 11(5), 303-307, 2023.
- [22] H. Pouraziz, R. V. Poursorkhabi, M. Y. Fard and R. Dabiri, Effects of wollastonite powder on the geotechnical properties of a dispersive clayey soil. *Discover Applied Sciences*, 6(8), 433, 2024. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06133-4>.
- [23] BS 1377-2, Methods of test for soils for civil engineering purposes. Part 2: Classification tests. British Standards Institution (BSI), 1990.
- [24] ASTM D4318, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2018.
- [25] ASTM Committee D-18 on Soil and Rock, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). ASTM International, 2007.
- [26] ASTM D2166, Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. ASTM International, West Conshohocken, 2016.
- [27] H. E. Yücel, M. Güneş, H. Ö. Öz, Y. Kaya and A. B. Yılmaz, Comprehensive study of the properties of engineered cementitious composites incorporating synthetic wollastonite microfibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 37(6), 0899-1561, 2025. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-19058>.
- [28] H. E. Yücel, H. Ö. Öz, M. Güneş and Y. Kaya, Rheological properties, strength characteristics and flexural performances of engineered cementitious composites incorporating synthetic wollastonite microfibers with two different high aspect ratios. *Construction and Building Materials*, 306, 0950-0618, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124921>.

