Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

DENİZ SUYU VE SİLİS DUMANI İLE STABİLİZE EDİLMİŞ KİLİN MEKANİK VE DAYANIKLILIK PERFORMANSI

MECHANICAL AND DURABILITY PERFORMANCE OF SEAWATER-SILICA FUME STABILISED CLAY

Melisa COSGUN[1], Hamza SAEED[2], Abdullah EKINCI[3]

ÖZET

Tatlı su kaynaklarının giderek azalması, deniz suyunun geoteknik zemin iyileştirmesinde sürdürülebilir bir alternatif olarak kullanılmasıyla ilgili ilgiyi artırmaktadır. Bu çalışmada, çimento ve farklı oranlarda silis dumanı ile stabilize edilen Kıbrıs Tuzla kilinin mekanik ve dayanıklılık performansı, deniz suyu ve tatlı su kullanılarak farklı kür sürelerinde incelenmiştir. Deneysel program kapsamında serbest basınç dayanımı (UCS), ultrasonik dalga geçiş süresi ölçümleri ve donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. Silis dumanı içeriği %0 ile %20, çimento içeriği ise %0 ile %15 aralığında değiştirilmiş ve numuneler 1,9 g/cm^3 toplam yoğunlukta hazırlanarak 3, 7, 14 ve 28 gün kürlenmiştir. Sonuçlar, kür süresi, çimento ve silis dumanı içeriği ile karışım suyu türünün stabilize kilin mekanik ve dayanıklılık davranışını belirgin şekilde etkilediğini göstermektedir. En yüksek 28 günlük UCS değeri, deniz suyu ile hazırlanan ve %15 çimento ile %15 silis dumanı içeren karışımda elde edilmiştir. Daha düşük çimento tüketimi dikkate alındığında, %10 çimento ve %15 silis dumanı içeren karışım sürdürülebilirlik açısından uygun bir seçenek olarak değerlendirilmiştir. Bu bulgular, uygun bağlayıcı oranları kullanıldığında deniz suyunun, özellikle tatlı su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde, zemin stabilizasyonu için alternatif bir karışım suyu olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Kil stabilizasyonu, Sürdürülebilir geoteknik, Deniz suyu kullanımı, Silis dumanı, Ultrasonik dalga geçiş süresi, Dayanıklılık*

ABSTRACT

The growing scarcity of freshwater resources has prompted the exploration of seawater as a sustainable alternative for geotechnical soil improvement. This study examines the mechanical and durability performance of Cyprus Tuzla clay stabilised with cement and varying proportions of silica fume, using both seawater and freshwater across different curing periods. The experimental program included unconfined compressive strength (UCS), ultrasonic pulse transit time measurements, and freeze-thaw tests. Silica fume content ranged from 0% to 20%, and cement content from 0% to 15%. Specimens were prepared at a bulk density of 1.9 g/cm^3 and cured for 3, 7, 14, and 28 days. The results demonstrated that curing time, cement and silica fume contents, and the type of mixing water significantly influenced the mechanical and durability behaviour of the stabilised clay. The highest UCS at 28 days was achieved by the seawater-prepared mixture containing 15% cement and 15% silica fume. From a sustainability perspective, the mixture with 10% cement and 15% silica fume was identified as a suitable alternative due to reduced cement consumption. These findings suggest that, with proper binder proportions, seawater can be used as an alternative mixing water for soil stabilisation, especially in areas where freshwater resources are limited.

[1] Yüksek Lisans Öğrencisi, İnşaat Mühendisliği Programı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Kuzey Kıbrıs Kampüsü, Güzelyurt, Mersin 10, Türkiye. cosgun.melisa@metu.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] Doktora Sonrası Araştırmacı, İnşaat Mühendisliği Programı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Kuzey Kıbrıs Kampüsü, Güzelyurt, Mersin 10, Türkiye. saeed@metu.edu.tr
[3] Doçent Doktor, İnşaat Mühendisliği Programı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Kuzey Kıbrıs Kampüsü, Güzelyurt, Mersin 10, Türkiye. ekincia@metu.edu.tr

Keywords: *Clay stabilisation, Sustainable geotechnics, Seawater utilisation, Silica fume, Ultrasonic pulse transit time, Durability*

1. GİRİŞ

İklim değişikliği ve artan su tüketimi, tatlı su kaynaklarına erişimi giderek zorlaştırmaktadır. Tatlı su kaynaklarının sınırlı olduğu kıyı bölgelerinde, mühendislik uygulamaları için alternatif su kaynaklarının değerlendirilmesi önemli hale gelmiştir. Yapılan bazı araştırmalar, deniz suyunun kil zeminlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde olumlu etkiler sağlayabileceğini ve geoteknik uygulamalarda tatlı suya alternatif bir kaynak olarak kullanılabileceğini göstermiştir (Li vd., 2014).

Kil zeminlerin karmaşık davranışı, uzun süredir geoteknik mühendisliğinde kapsamlı olarak araştırılmaktadır. Kuzey Kıbrıs'ın doğusunda yer alan Tuzla bölgesi, yüksek şişme potansiyeline sahip kil zeminlerin yoğun olarak bulunduğu bir alandır. Tuzla kili, düşük mukavemet, yüksek plastisite, düşük sıkıştırılabilirlik ve yüksek şişme potansiyeli gibi özellikler sergiler (Nalbantoğlu, 2004). Bu özellikler nedeniyle problemli zemin olarak değerlendirilen Tuzla kili, zemin iyileştirme yöntemlerinin araştırılması için uygun bir malzemedir.

Çimento, yüksek dayanım ve taşıma kapasitesi sağlaması ile sıkıştırılabilirliği azaltması nedeniyle zemin iyileştirmesinde yaygın olarak kullanılan bağlayıcılardan biridir (Jiang vd., 2021). Çimentonun hidratasyonu sırasında oluşan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jelleri, zemin parçacıkları arasındaki bağlanmayı artırır ve mukavemet gelişimine katkı sağlar. Bu gelişim genellikle kür süresi ile birlikte artar (Jiang vd., 2021). Ancak, deniz suyunda bulunan klorür, sülfat ve magnezyum gibi iyonlar hidratasyon reaksiyonlarını etkileyerek etrenjit oluşumu, şişme, çatlama ve yapısal kararsızlık gibi sorunlara neden olabilir (Li vd., 2014). Silis dumanı, kireç ve uçucu kül gibi mineral katkıların kullanılması bu etkilerin azaltılmasına yardımcı olurken; aynı zamanda çimento tüketimini ve buna bağlı karbon emisyonlarını da azaltabilir (Almuaythir vd., 2025).

Silis dumanı, silikon metal ve ferrosilikon üretimi sırasında ortaya çıkan ve yüksek oranda SiO_2 içeren oldukça ince taneli bir endüstriyel yan üründür (Yang vd., 2020). Silis dumanındaki reaktif SiO_2, çimento hidratasyonu sırasında oluşan kalsiyum hidroksit (CH) ile reaksiyona girerek ikincil C-S-H ürünlerinin oluşumuna katkı sağlar. Ayrıca, ince taneli yapısı sayesinde parçacıklar arasındaki boşlukları doldurarak daha yoğun bir yapı oluşumunu destekler (Goodarzi vd., 2016). Silis dumanının, kil zeminlerin plastisite, katyon değişim kapasitesi, özgül yüzey alanı ve serbest şişme eğilimini azaltabildiği de rapor edilmiştir (Saeed vd., 2021). Bu nedenle, çimentonun bir kısmı ile birlikte silis dumanı kullanılması hem mühendislik performansı hem de çevresel açıdan avantaj sunabilir.

Deniz suyu, tatlı sudan farklı olarak sodyum klorür, magnezyum klorür, sülfat, kalsiyum ve potasyum gibi çeşitli çözünmüş iyonlar içerir (Li vd., 2014). Li vd. (2014), çimento ile stabilize edilmiş kilde 90 günlük şişmenin tatlı su kullanımında %0,65 iken deniz suyu kullanımında %1,69'a yükseldiğini ve bunun mikro yapısal gelişimdeki farklılıklardan kaynaklanabileceğini belirtmiştir. Bilgen ve Kavak (2010) ise deniz suyuyla hazırlanan numunelerde erken yaşlarda daha yavaş mukavemet gelişimi gözlemlerken, 28 günlük kür sonunda tatlı su ile hazırlanan numunelere kıyasla daha yüksek dayanım değerleri elde etmişlerdir.

Bu çalışma, çimento ve silis dumanı ile stabilize edilmiş Tuzla kilinin mekanik ve dayanıklılık davranışı üzerinde karışım suyu türünün etkisini incelemektedir. Bu doğrultuda, deniz suyu ve tatlı su kullanılarak hazırlanan numunelerde kür süresi, çimento içeriği ve silis dumanı oranının serbest basınç dayanımı, ultrasonik dalga geçiş süresi ve donma-çözülme dayanıklılığı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2. METODOLOJİ

Bu çalışmada, ana malzeme olarak Kıbrıs'ın Tuzla bölgesinden temin edilen problemli kil zemin kullanılmıştır. Tuzla kili, yüksek plastisiteye, düşük mukavemete ve şişme eğilimine sahip alüvyal bir kil olarak tanımlanmaktadır (Nalbantoğlu, 2004). Kil, 50°C'de 24 saat boyunca kurutulmuş, ardından öğütülerek iri parçacıklar ve taş kalıntıları uzaklaştırılmıştır. Bu işlem için 4,75 mm'lik elekten geçirilmiştir. Kilin temel fiziksel özellikleri Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1. Tuzla kilinin fiziksel özellikleri (Saeed vd., 2021)

Özellik	Değer
Kil boyutu fraksiyonu, ≤ 2 μm (%)	57,91
Silt boyutu fraksiyonu, 2-75 μm (%)	41,95
Kum boyutu fraksiyonu, > 75 μm (%)	0,14
Tane özgül ağırlığı, (G_s)	2,73
Likit limit, LL (%)	58,3
Plastik limit, PL (%)	29,1
USCS sınıflandırması	CH

Bağlayıcı olarak Portland çimentosu (OPC), kilin kuru ağırlığının %0, %5, %10 ve %15'i oranlarında kullanılmıştır. Silis dumanı (SF) ise çimento içeren karışımlarda, kullanılan çimentonun kuru ağırlığı esas alınarak %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ilave edilmiştir. Buna göre, %5, %10 ve %15 çimento içeren her bir karışım grubu için beş farklı silis dumanı oranı (%0, %5, %10, %15 ve %20) ayrı ayrı uygulanmıştır. %0 çimento içeren numuneler ise katkısız kontrol numunesi olarak hazırlanmış ve bu karışımlara silis dumanı eklenmemiştir. Böylece, farklı çimento ve silis dumanı kombinasyonlarının stabilize kilin mekanik ve dayanıklılık davranışı üzerindeki etkileri sistematik ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Kullanılan silis dumanının temel fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2'de sunulmaktadır.

Tablo 2. Silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri (Saeed vd., 2021)

Özellik	Değer
SiO_2 (%)	82,2
Al_2O_3 (%)	0,50
Fe_2O_3 (%)	0,42
CaO (%)	1,55
MgO (%)	0,00
SO_3 (%)	3,03
Kızdırma kaybı, LOI (%)	5,66
Özgül yüzey alanı, SSA (m^2/g)	29
Tane özgül ağırlığı, (G_s)	2,2

Karışım suyu türünün stabilize kil üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, tatlı su ve deniz suyu ayrı ayrı kullanılmıştır. Tüm numuneler 1,9 g/cm^3 hedef toplam yoğunlukta ve %25 su içeriğiyle hazırlanmıştır. Kuru kil, çimento ve silis dumanı homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmış, ardından karışım suyu eklenmiştir. Hazırlanan karışımlar, 10 cm yüksekliğinde ve 5 cm çapında kalıplara sıkıştırılmıştır. Numuneler, nem kaybını önlemek için plastik örtü ile sarılmış ve 3, 7, 14 ile 28 gün süreyle kürlenmiştir.

Numunelerin mekanik ve iç yapı özellikleri, farklı kür sürelerinde serbest basınç dayanımı (UCS) deneyleri ve ultrasonik dalga geçiş süresi ölçümleri ile incelenmiştir. Ultrasonik ölçümler, UCS deneylerinden önce gerçekleştirilmiş ve dalganın numunenin üst yüzeyinden alt yüzeyine geçiş süresi µs cinsinden kaydedilmiştir (Miturski vd., 2021). UCS deneyleri ise farklı karışım bileşimleri ve kür sürelerinde meydana gelen dayanım gelişimini değerlendirmek amacıyla uygulanmıştır.

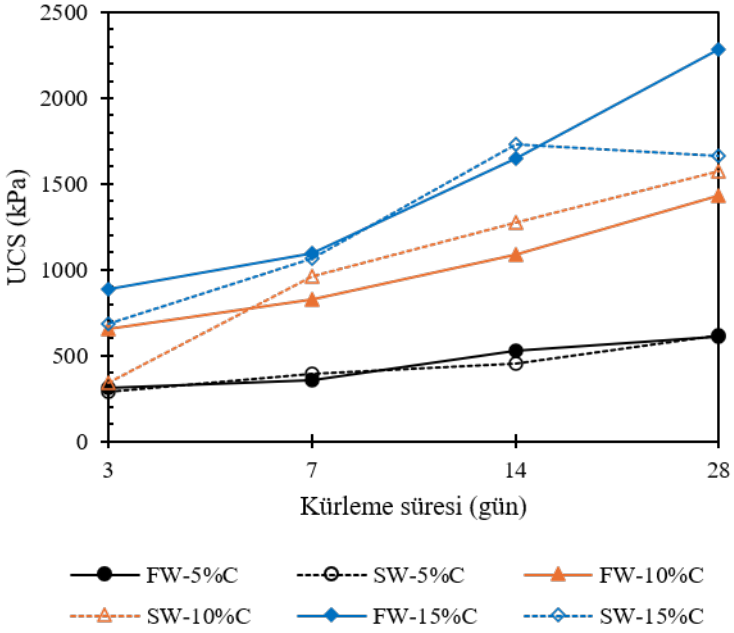
Dayanıklılık performansını belirlemek amacıyla, 28 gün kürlenmiş numunelere donma-çözülme deneyleri uygulanmıştır. Deneyler, Consoli vd. (2019) tarafından önerilen yaklaşıma dayalı olarak, ASTM D560 prosedürünün değiştirilmiş sıcaklık koşullarında yapılmıştır. Numuneler toplamda 12 döngüye tabi tutulmuştur. Her döngü, 24 saat boyunca -10°C'de donma ve ardından 24 saat boyunca +25°C'de çözülme aşamalarını içermektedir. Her döngü sonrasında, gevşeyen yüzey parçacıklarını uzaklaştırmak için numune yüzeyine tel fırça ile 19 fırça darbesi uygulanmış ve kümülatif kütle kaybı belirlenmek üzere numuneler tartılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

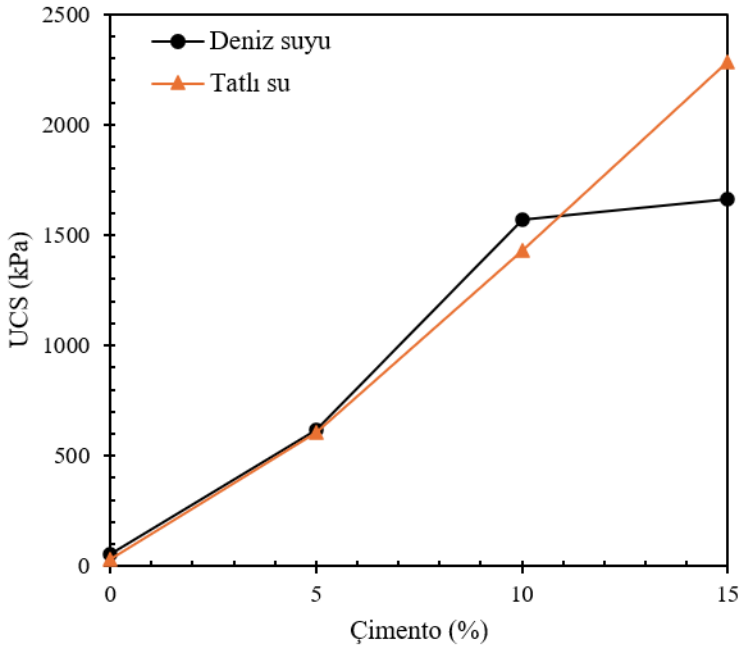
Çimento içeriği ve kür süresi, stabilize Tuzla kilinin serbest basınç dayanımı üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Şekil 1'de görüldüğü üzere, UCS değerleri genel olarak kür süresinin artmasıyla yükselmiş ve bu artış yüksek çimento içeriklerinde daha belirgin hale gelmiştir. Tatlı su ile hazırlanan %15 çimento içeren numuneler, 28 günlük kür sonunda 2284 kPa ile en yüksek UCS değerine ulaşmıştır. %10 çimento içeren numunelerde de belirgin bir dayanım artışı gözlenirken, %5 çimento içeren numunelerde bu gelişim daha sınırlı kalmıştır. Deniz suyu ile hazırlanan %15 çimento içeren (SW-15%C) numunelerde ise dayanım 14 güne kadar artmış, 14-28 gün arasında hafif bir azalma göstermiştir. Bu davranış, deniz suyundaki çözünmüş iyonların çimento hidratasyonu üzerindeki zamana bağlı etkisiyle açıklanmaktadır. Deniz suyunun yüksek iyonik içeriği erken yaşlarda hidratasyon reaksiyonlarını hızlandırarak dayanım gelişimini desteklerken, ilerleyen kür sürelerinde özellikle Mg^{2+} ve SO_4^{2-} iyonlarının hidratasyon ürünleriyle etkileşimi ikincil reaksiyon ürünlerinin oluşumunu artırmakta ve çimentolu yapının sürekliliğini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle SW-15%C numunelerinde erken yaşta elde edilen hızlı dayanım artışının ardından 14-28 gün arasında sınırlı bir dayanım kaybı gözlenmiştir (Li vd., 2014). Genel olarak dayanım gelişimi, çimento hidratasyonunun ilerlemesi ve oluşan C-S-H ürünlerinin zemin parçacıkları arasındaki bağlanmayı güçlendirmesiyle ilişkilidir (Jiang vd., 2021).

Çimento içeriğinin etkisi, 28 günlük sonuçlar temel alınarak Şekil 2'de karşılaştırılmıştır. Her iki karışım suyu türü için de çimento içeriğinin artması, UCS değerlerinde genel bir yükselme sağlamıştır. %5 çimento içeren ve tatlı su ile deniz suyu kullanılarak hazırlanan numuneler benzer dayanım değerleri göstermiştir. %10 çimento içeren ve deniz suyu kullanılan numuneler daha yüksek dayanım sergilerken, %15 çimento içeren ve tatlı su ile

hazırlanan numunelerde dayanım artışı daha belirgin olmuştur. Bu farklılık, deniz suyunda bulunan çözünmüş iyonların çimento hidratasyonunun kimyasal süreçlerini ve oluşan bağlayıcı ürünlerin gelişimini etkilemesiyle açıklanabilir.



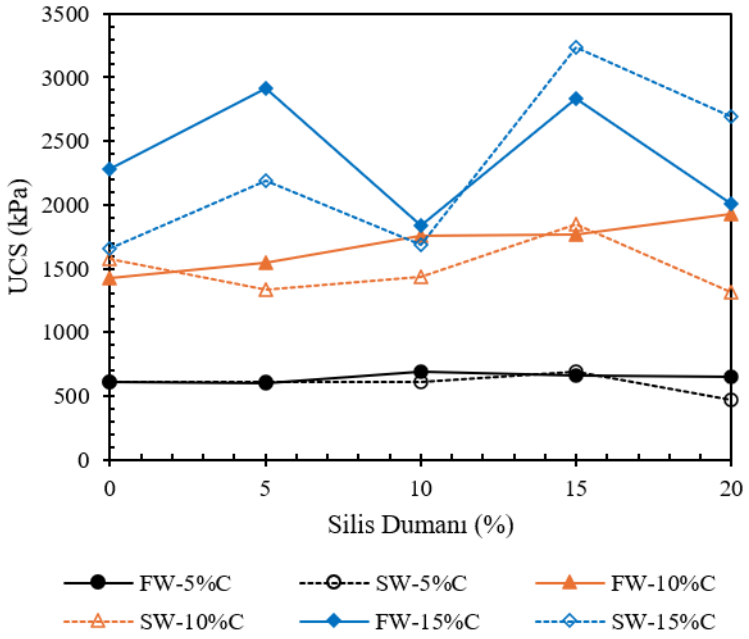
Şekil 1. Kür süresinin UCS üzerindeki etkisi



Şekil 2. Çimento içeriğinin 28 günlük UCS üzerindeki etkisi

Silis dumanının UCS üzerindeki etkisi Şekil 3'te sunulmaktadır. Sonuçlar, silis dumanı içeriği ile dayanım arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğunu göstermektedir. Silis dumanı, çimento hidratasyonu sonucu oluşan kalsiyum hidroksit ile puzolanik reaksiyona girerek ikincil C-S-H ürünlerinin oluşumuna katkıda bulunabilir. Ayrıca, ince taneli yapısı sayesinde parçacıklar arasındaki boşlukları doldurarak daha yoğun bir matrisin oluşmasına

yardımcı olabilir (Li vd., 2014; Almuaythir vd., 2025). Bu etki, özellikle yüksek çimento içeriklerinde daha belirgin şekilde ortaya çıkmıştır. En yüksek 28 günlük UCS değeri, deniz suyu ile hazırlanan ve %15 çimento ile %15 silis dumanı içeren numunelerde 3240 kPa olarak elde edilmiştir. Bu değer, yalnızca %15 çimento içeren eşdeğer deniz suyu numunelerinin dayanımının yaklaşık iki katıdır. Buna karşılık, %20 silis dumanı ve %5 çimento içeren deniz suyu numunelerinde 473,8 kPa ile daha düşük bir dayanım elde edilmiştir. Bu sonuçlar, silis dumanının etkisinin yalnızca katkı oranına değil, aynı zamanda çimento içeriği ve karışım suyu türü ile olan etkileşimine de bağlı olduğunu göstermektedir.

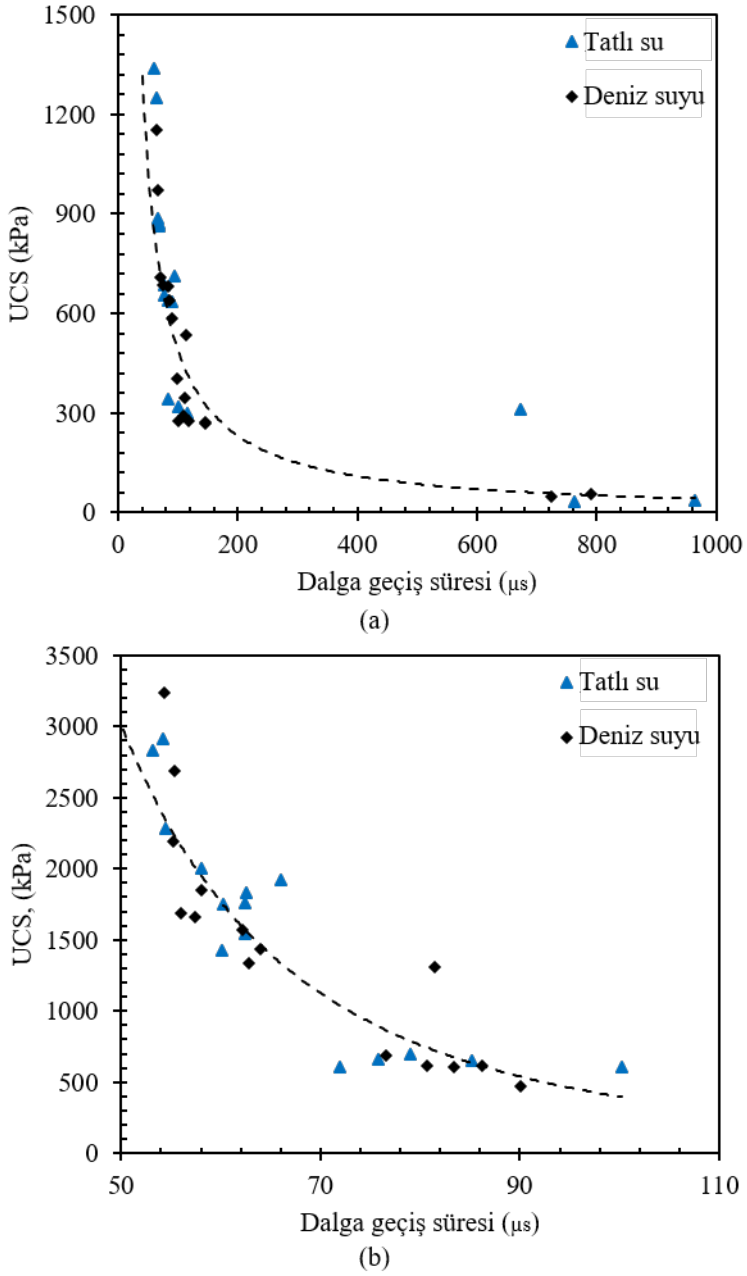


Şekil 3. Silis dumanı içeriğinin 28 günlük UCS üzerindeki etkisi

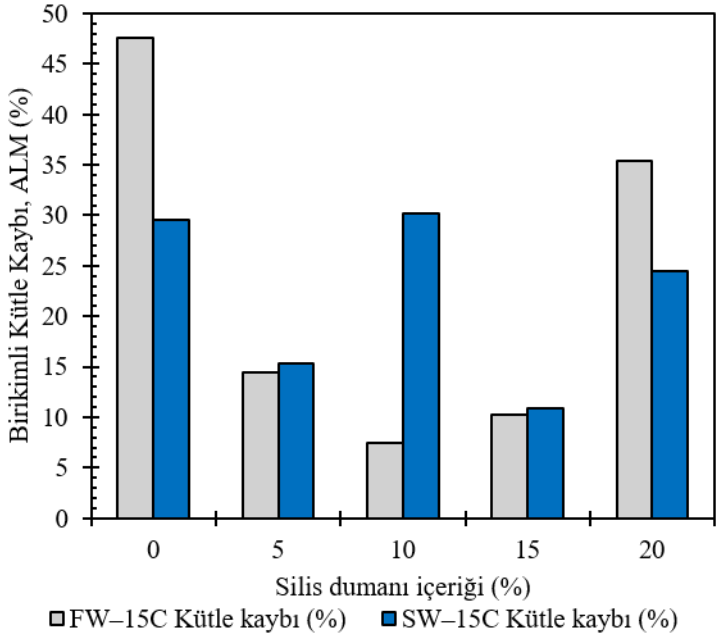
UCS ile ultrasonik dalga geçiş süresi arasındaki ilişki, 3 ve 28 günlük kür süreleri için sırasıyla Şekil 4(a) ve Şekil 4(b)'de sunulmaktadır. Genel olarak, kür süresi arttıkça dalga geçiş süresi azalmış ve daha yüksek UCS değerleriyle birlikte daha düşük geçiş süreleri elde edilmiştir. Ultrases ölçümleri, kür süresi arttıkça dalga geçiş süresinin genellikle azaldığını göstermektedir. Bu eğilim, özellikle yüksek çimento içeriğine sahip numunelerde daha belirgin şekilde ortaya çıkar. Hidratasyon ve puzolanik reaksiyonlar sonucu oluşan bağlayıcı ürünlerin, parçacıklar arasındaki boşlukları azaltması ve yapısal sürekliliği artırması, ultrasonik dalgaların numune içerisinden daha kısa sürede geçmesine katkı sağlayabilir. Silis dumanı içeriği ile dalga geçiş süresi arasında doğrusal olmayan bir ilişki gözlemlenmiştir. Yirmi sekiz günlük numunelerde en düşük geçiş süreleri, %15 çimento ve %15 silis dumanı içeren karışımlarda, tatlı su için 53,2 µs ve deniz suyu için 54,3 µs olarak ölçülmüştür. Aynı karışım grubu yüksek UCS değerleri de göstermiştir. Böylece, ultrasonik dalga geçiş süresi ile mekanik dayanım arasında genel olarak ters yönlü ve tutarlı bir ilişki gözlenmiştir.

Donma-çözülme deneyleri sonucunda belirlenen kütle kaybının, silis dumanı içeriğine bağlı olarak nasıl değiştiği Şekil 5'te gösterilmektedir. Sonuçlar, donma-çözülme dayanıklılığının esas olarak çimento içeriğine bağlı olduğunu ve silis dumanı oranının bu davranışı belirgin şekilde etkilediğini göstermiştir. %5 çimento içeren karışımlar 12 döngüyü tamamlayamazken, %10 çimento içeren numunelerde dayanıklılık artmış fakat belirgin kütle kayıpları gözlemlenmiştir. %15 çimento içeren karışımların çoğu ise 12 donma-çözülme

döngüsünü başarıyla tamamlamıştır. Silis dumanı ilavesi, özellikle yüksek çimento içeriklerinde ve %15 seviyesinde donma-çözülme direncini artırmıştır. Buna karşılık, %20 silis dumanı içeriğinde dayanıklılıkta azalma tespit edilmiştir. Deniz suyu ile hazırlanan, %15 çimento ve %15 silis dumanı içeren karışım, 12 döngü sonunda başlangıç kütlesinin %89,1'ini korumuş ve aynı zamanda en yüksek UCS değerini sağlamıştır. Bu sonuç, uygun çimento ve silis dumanı kombinasyonunun deniz suyu kullanıldığında da yeterli mekanik performans ve donma-çözülme dayanıklılığı sağlayabildiğini göstermektedir.



Şekil 4. UCS-ultrasonik dalga geçiş süresi ilişkisi: (a) 3. gün ve (b) 28. gün



Şekil 5. Silis dumanı içeriğine bağlı donma-çözülme kütle kaybı

Genel olarak elde edilen sonuçlar, deniz suyunun tek başına tatlı suya kıyasla doğrudan ve sürekli bir mekanik üstünlük sağlamadığını; buna karşılık, uygun çimento ve silis dumanı oranlarıyla birlikte kullanıldığında yüksek dayanım ve yeterli donma-çözülme dayanıklılığı sağlayabildiğini göstermektedir. Bu durum, deniz suyunun stabilize kil üzerindeki etkisinin yalnızca karışım suyu türüne değil, aynı zamanda bağlayıcı bileşimi ve bağlayıcılar arasındaki etkileşime bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek çimento içeriğinde, silis dumanının puzolanik aktivitesi ve ince taneli yapısından kaynaklanan dolgu etkisi, çimentolu matrisin daha yoğun ve sürekliliği yüksek bir yapıya ulaşmasına katkı sağlamaktadır. Bu nedenle, maksimum mekanik performans açısından %15 çimento ve %15 silis dumanı içeren karışım en başarılı bileşim olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, yalnızca en yüksek dayanımın hedeflenmesi daha yüksek çimento tüketimini de beraberinde getirmektedir. Çimento kullanımının azaltılması dikkate alındığında, %10 çimento ve %15 silis dumanı içeren karışım, daha düşük çimento miktarıyla yeterli mekanik ve dayanıklılık performansı sağlaması nedeniyle kaynak verimliliği açısından daha dengeli bir alternatif oluşturmaktadır. Bu bulgular, deniz suyunun özellikle tatlı su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde, uygun bağlayıcı oranlarıyla birlikte kullanılması durumunda geoteknik zemin stabilizasyonu için uygulanabilir bir karışım suyu alternatifi olduğunu göstermektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Tuzla kilinin çimento ve silis dumanı ile stabilizasyonunda deniz suyu ve tatlı su kullanımının mekanik ve dayanıklılık performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, kür süresi, çimento içeriği, silis dumanı oranı ve karışım suyu türünün stabilize kilin davranışını birlikte etkilediğini ortaya koymuştur.

Kür süresinin ve çimento içeriğinin artması genel olarak UCS değerlerini artırırken, silis dumanının etkisinin doğrusal olmadığı ve uygun çimento ile silis dumanı kombinasyonu kullanıldığında bu etkinin daha belirgin hale geldiği görülmüştür. En yüksek 28 günlük UCS

değeri, deniz suyu ile hazırlanan ve %15 çimento ile %15 silis dumanı içeren karışımda 3240 kPa olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, uygun silis dumanı içeriğinin deniz suyu kullanılan çimentolu kil sistemlerinde dayanım gelişimine önemli katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Ultrasonik dalga geçiş süresi ölçümleri, kür süresi arttıkça dalga geçiş süresinin genellikle azaldığını ve daha yüksek UCS değerlerine sahip numunelerin daha düşük geçiş süreleri sergilediğini ortaya koymuştur. Böylece, ultrasonik ölçümler ile mekanik dayanım arasında genel olarak tutarlı bir eğilim belirlenmiştir.

Donma-çözülme deneyleri, dayanıklılığın büyük ölçüde çimento içeriğine bağlı olduğunu ve silis dumanının özellikle yüksek çimento oranlarında uygun miktarda kullanılmasıyla dayanıklılığın iyileştirilebildiğini göstermiştir. Deniz suyu ile hazırlanan, %15 çimento ve %15 silis dumanı içeren karışım, 12 donma-çözülme döngüsü sonunda başlangıç kütlesinin %89,1'ini korumuştur.

Maksimum mekanik performans açısından, %15 çimento ve %15 silis dumanı içeren karışım en uygun bileşim olarak belirlenmiştir. Daha düşük çimento tüketimi ile yeterli performans sağlayan %10 çimento ve %15 silis dumanı içeren karışım ise kaynak verimliliği açısından daha uygun bir alternatif olarak değerlendirilmiştir. Genel olarak, bulgular uygun bağlayıcı oranları kullanıldığında deniz suyunun, özellikle tatlı su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde, zemin stabilizasyonu için alternatif bir karışım suyu olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

Almuaythir, S., Zaini, M.S.I. ve Hasan, M. (2025), "Shear Strength, Compressibility, and Consolidation Behaviour of Expansive Clay Soil Stabilized with Lime and Silica Fume", Scientific Reports, Vol. 15, No. 1, 26185.

Bilgen, G. ve Kavak, A. (2010), "Effects of Seawater on Geotechnical Properties of a Clay Soil", Fresenius Environmental Bulletin, Vol. 19, No. 8.

Consoli, N.C., Godoy, V.B., Rosenbach, C.M.C. ve Peccin Da Silva, A. (2019), "Effect of Sodium Chloride and Fibre-Reinforcement on the Durability of Sand-Coal Fly Ash-Lime Mixes Subjected to Freeze-Thaw Cycles", Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 37, No. 1, 107–120.

Goodarzi, A.R., Akbari, H.R. ve Salimi, M. (2016), "Enhanced Stabilization of Highly Expansive Clays by Mixing Cement and Silica Fume", Applied Clay Science, Vol. 132–133, 675–684.

Jiang, N., Wang, C., Wang, Z., Li, B. ve Liu, Y. (2021), "Strength Characteristics and Microstructure of Cement Stabilized Soft Soil Admixed with Silica Fume", Materials, Vol. 14, No. 8, 1929.

Li, Q., Chen, J., Shi, Q. ve Zhao, S. (2014), "Macroscopic and Microscopic Mechanisms of Cement-Stabilized Soft Clay Mixed with Seawater by Adding Ultrafine Silica Fume", Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2014, 1–12.

Miturski, M., Sas, W., Radzevičius, A., Šadzevičius, R., Skominas, R., Stelmaszczyk, M. ve Głuchowski, A. (2021), "Effect of Dispersed Reinforcement on Ultrasonic Pulse Velocity in Stabilized Soil", Materials, Vol. 14, No. 22, 6951.

Nalbantoğlu, Z. (2004), "Effectiveness of Class C Fly Ash as an Expansive Soil Stabilizer", Construction and Building Materials, Vol. 18, No. 6, 377–381.

Saeed, H., Alibrahim, B., Garoushi, A. ve Nalbantoglu, Z. (2021), "Effect of Micro Silica Fume on the Alluvial Clay Behaviour", 14th International Congress on Advances in Civil Engineering, İstanbul, Türkiye.

Yang, Q., Du, C., Zhang, J. ve Yang, G. (2020), "Influence of Silica Fume and Additives on Unconfined Compressive Strength of Cement-Stabilized Marine Soft Clay", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 32, No. 2, 04019346.