4. Ulusal
Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu

14 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ PLASTİK LİFLİ ÇİMENTOLU KİLLERDE KARIŞTIRMA YÖNTEMİNİN ETKİSİ

MIXING METHOD EFFECTS ON CEMENT-TREATED CLAY REINFORCED WITH RECYCLED PLASTIC FIBRES

Sevilay DEMİR[1], Necip ÖZGÜMÜŞ[2], Necati Efe ÇETİN[3], Hamza SAEED[4], Abdullah EKİNCİ[5]

ÖZET

Killi zeminler, düşük dayanım ve yüksek deformasyon nedeniyle mühendislik uygulamalarında önemli zorluklar sunar. Bu araştırmada, çimento stabilizasyonu, geri dönüştürülmüş plastik lif donatısı, kür süresi ve karıştırma yönteminin killi zeminin serbest basınç dayanımı (UCS) üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Portland çimentosu kuru zemin kütlesinin %3, %6 ve %9'u oranında karışıma eklenmiş, geri dönüştürülmüş LDPE poşet ve PET şişelerden elde edilen lifler ise %0,25, %0,50 ve %0,75 oranlarında kullanılmıştır. Çimento ile stabilize edilmiş numuneler kuru ve yaş karıştırma yöntemleriyle hazırlanmış ve 3, 7 ve 14 gün süreyle kür edilmiştir. Sonuçlar, artan çimento oranı ve kür süresinin UCS değerlerinde kayda değer bir yükselme sağladığını göstermiştir. Karıştırma yönteminin etkisi ise çimento içeriğine ve kür süresine bağlı olarak değişmiştir. On dört günlük kür sonunda yaş karıştırma, tüm çimento oranlarında daha yüksek UCS değerleri elde etmiştir ve en yüksek dayanım %9 çimento ile 1165,50 kPa olarak belirlenmiştir. Sadece lif donatısı kullanımı UCS değerini yaklaşık %54 oranında artırmıştır. Daha ileri lif deneyleri için, 14 gün kürlenen ve %3 çimento içeren kuru karıştırılmış numune düşük çimento içerikli referans olarak seçilmiştir. En iyi birleşik sonuç, %0,50 PET şişe lifi eklenen numunede elde edilmiştir; UCS değeri 178,70 kPa'dan 263,75 kPa'ya çıkarak %47,6'lık bir artış göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: *Çimento ile stabilize edilmiş kil; Geri dönüştürülmüş plastik lifler; LDPE; PET; Karıştırma yöntemi; Serbest basınç dayanımı (UCS)*

ABSTRACT

Clay soils are characterised by low strength and significant deformation, presenting challenges for engineering applications. This study examines how cement stabilisation, recycled plastic fibre reinforcement, curing period, and mixing method influence the unconfined compressive strength (UCS) of clay soil. Ordinary Portland cement was added at 3, 6, and 9% by dry soil mass, while fibres from recycled LDPE bags and PET bottles were incorporated at 0.25, 0.50, and 0.75%. Cement-treated specimens were prepared using dry and wet mixing methods and cured for 3, 7, and 14 days. Results show that increasing cement content and curing duration

[1] Lisans Öğrencisi, İnşaat Mühendisliği Programı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Kuzey Kıbrıs Kampüsü, Güzelyurt, Mersin 10, Türkiye. sevilay.demir@metu.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] Lisans Öğrencisi, İnşaat Mühendisliği Programı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Kuzey Kıbrıs Kampüsü, Güzelyurt, Mersin 10, Türkiye. necip.ozgumus@metu.edu.tr
[3] Lisans Öğrencisi, İnşaat Mühendisliği Programı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Kuzey Kıbrıs Kampüsü, Güzelyurt, Mersin 10, Türkiye. necatiefe.cetin@metu.edu.tr
[4] Doktora Sonrası Araştırmacı, İnşaat Mühendisliği Programı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Kuzey Kıbrıs Kampüsü, Güzelyurt, Mersin 10, Türkiye. saeed@metu.edu.tr
[5] Doçent Doktor, İnşaat Mühendisliği Programı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Kuzey Kıbrıs Kampüsü, Güzelyurt, Mersin 10, Türkiye. ekincia@metu.edu.tr

significantly enhance UCS. The impact of mixing method varied with cement content and curing period; after 14 days, wet mixing achieved higher UCS values at all cement levels, reaching a maximum of 1165.50 kPa with 9% cement. Fibre-only reinforcement improved UCS by up to 54%. For further reinforcement, the dry-mixed 3% cement specimen (14 days) was chosen as a low-cement reference. The optimal combined outcome was achieved with 0.50% PET bottle fibres, raising UCS from 178.70 to 263.75 kPa, a 47.6% increase.
Keywords: *Cement-treated clay; Recycled plastic fibres; LDPE; PET; Mixing method; Unconfined compressive strength (UCS)*

1. GİRİŞ

Geri dönüştürülmüş plastik liflerin çimento ile stabilize edilmiş killerde kullanımı, zemin dayanımını, sünekliği ve dayanıklılığı artırmasının yanı sıra plastik atıkların azaltılmasına katkı sağlayan etkili bir yöntem olarak giderek daha fazla ilgi görmektedir. Ancak mevcut çalışmaların çoğunda lif içeriği, lif uzunluğu, çimento dozajı ve kür süresi gibi parametreler araştırılırken, karıştırma yöntemi genellikle standart bir numune hazırlama prosedürü olarak sabit tutulmaktadır. Bu nedenle, karıştırma prosedürünün mekanik performans üzerindeki bağımsız etkisi hâlâ sınırlı düzeyde araştırılmıştır.

Birçok çalışma, killi zeminlerde çimento ve liflerin birlikte kullanılmasının mekanik açıdan önemli faydalar sağladığını göstermiştir. Fatahi vd. (2012), polipropilen, geri dönüştürülmüş halı ve çelik liflerle güçlendirilmiş çimento ile stabilize edilmiş kaoliniti incelemiştir. Lif ilavesi, tepe ve artık basınç dayanımını artırmış, ayrıca çimento ile stabilize edilmiş kilin gevrek davranışını daha sünek bir hale getirmiştir. Numuneler, kil ve liflerin önce su ile karıştırılması, ardından çimento şerbetinin eklenmesi ve homojenliği sağlamak amacıyla elle ve mekanik karıştırmanın dönüşümlü olarak uygulanmasıyla hazırlanmıştır (Fatahi vd., 2012).

Geri dönüştürülmüş PET malzemelerin kullanımı da benzer olumlu sonuçlar ortaya koymuştur. Bozyigit vd. (2021), %0, %3, %6 ve %9 oranlarında çimento ile %0-2 arasında değişen PET şerit içeriği kullanarak çimento ile stabilize edilmiş kaolin kili üzerinde PET şişe şeritlerinin etkisini araştırmıştır. Dayanım artışı bakımından optimum PET şerit miktarı yaklaşık %1-1,5 aralığında bulunmuş, ayrıca çimento miktarı ve kür süresindeki artışın dayanımı olumlu yönde etkilediği gösterilmiştir. Ancak karıştırma prosedürü bağımsız bir değişken olarak değerlendirilmediğinden, numune hazırlama yönteminin etkisi doğrudan analiz edilememiştir.

Haider vd. (2023) iki farklı boyuttaki parçalanmış PET ile güçlendirilmiş zemin-çimento karışımlarını incelemiştir. Zemin, PET parçacıkları ve çimento, su eklenmeden önce kapalı bir torba içinde en az beş dakika süreyle kuru olarak karıştırılmıştır. Ardından karışımlar beş tabaka halinde sıkıştırılmıştır. Çimento-PET karışımlarının, işlem görmemiş örneklerle karşılaştırıldığında dayanımı yaklaşık %28-91 oranında artırdığı, ayrıca PET donatısının ıslanma-kuruma etkilerine karşı direnci geliştirdiği saptanmıştır. Çalışmada, PET-çimento ile stabilize edilmiş zeminlerin performansının numune hazırlama ve karıştırma tutarlılığına, zemin türüne, sıkıştırma enerjisine ve PET parçacıklarının geometrisine bağlı olduğu vurgulanmıştır.

Mishaal ve Aldaood (2025) çimento ile stabilize edilmiş zeminde geri dönüştürülmüş plastik lif donatısının etkisini incelemişlerdir. Su şişelerinden elde edilen plastik atık lifler önce kuru zemin içinde dağıtılmış, ardından su eklenmiş ve nemin homojen dağılması için belirli bir süre beklenmiştir. Çimento ile stabilize edilen numunelerde ise çimento önce kuru zemine eklenmiş, ardından lif donatılı numuneler için uygulanan hazırlama prosedürü izlenmiştir. Numuneler sıkıştırmadan önce yaklaşık 10 dakika boyunca bekletilmiştir. %4 çimento ve 28

günlük kür süresiyle yapılan deneylerde, serbest basınç dayanımı açısından optimum lif içeriği %1 olarak saptanmış ve dayanım 1800 kPa'dan 2500 kPa'ya yükselmiştir.

Geri dönüştürülmemiş liflerle yapılan araştırmalar da karıştırma sırası ve lif dağılımının önemine dair önemli bulgular ortaya koymaktadır. Zhao vd. (2024), kaolin-çimento karışımlarında polipropilen, polivinil alkol ve cam liflerini karşılaştırmıştır. Uygulanan prosedürde önce zemin ve çimento karıştırılmış, ardından lifler eklenmiş ve su en son ilave edilmiştir. Lif kümelenmesi görüldüğünde, lifler elle ayrılmıştır. Yüksek lif içeriklerinde aglomerasyon, liflerin birbirine dolanması ve ek boşluk oluşumu nedeniyle dayanımın düştüğü rapor edilmiştir.

Karıştırma sırası, sıkıştırma yöntemiyle birlikte ele alınmalıdır. Abou Diab vd. (2018) darbeli sıkıştırma ile hazırlanan lif donatılı kil numunelerinde elde edilen dayanım artışlarının, yoğurma tipi sıkıştırma ile hazırlanan numunelere kıyasla üç kata kadar daha fazla olduğunu bildirmiştir. Bu fark, esas olarak lif yönlenmesindeki değişikliklerle açıklanmıştır. Sonuç olarak, karıştırma yönteminden kaynaklandığı düşünülen bir etkinin, aslında yoğunluk, lif yönlenmesi veya sıkıştırma enerjisi gibi diğer faktörlerden de kaynaklanabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Saha ölçeğindeki derin karıştırma çalışmaları da karıştırma ekipmanı ve işlem tekrarının önemini göstermektedir. Shu vd. (2022) organik kilde iki karıştırma geçişinde bağlayıcı şerbetinin yüzeye sızdığını, dört ve altı geçişte ise tekrarlanan karıştırma sayesinde bu durumun önlendiğini bildirmiştir. Altı geçişin uygulama süresini dört geçişe göre yaklaşık %50 artırması nedeniyle, dört karıştırma geçişi saha uygulaması açısından yeterli ve daha verimli bir seçenek olarak değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, çimento içeriği, kür süresi, karıştırma yöntemi ve geri dönüştürülmüş plastik lif donatısının killi zeminin serbest basınç dayanımı (UCS) üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneylerde %3, %6 ve %9 çimento içerikleri, kuru ve yaş karıştırma koşullarında, 3, 7 ve 14 günlük kür süreleri sonunda incelenmiştir. Ayrıca, LDPE poşetlerden ve PET şişelerden elde edilen geri dönüştürülmüş lifler farklı oranlarda kullanılarak donatı etkileri ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Sadece çimento içeren numunelerin 14 günlük dayanım sonuçlarına dayanarak, düşük çimento içeriğiyle ve kuru karıştırma yöntemiyle hazırlanan bir koşul seçilmiş; çimento tüketimini artırmadan ek dayanım sağlanıp sağlanamayacağını değerlendirmek için belirli lif oranlarıyla tekrar incelenmiştir. Bu çalışma, çimento ile stabilize edilmiş kilde karıştırma prosedürünün etkisini ortaya koymayı ve geri dönüştürülmüş plastik liflerin tamamlayıcı ve sürdürülebilir bir donatı yaklaşımı olarak etkinliğini değerlendirmeyi hedeflemiştir.

2. MALZEMELER VE YÖNTEMLER

Bu çalışmada kullanılan killi zemin, Kuzey Kıbrıs'ın Tuzla bölgesinden temin edilmiştir. Zemin, numune hazırlama işleminden önce yaklaşık 48 saat boyunca havada kurutulmuş, manuel olarak ufalanmış ve 4,75 mm elekten geçirilmiştir. Zeminin temel fiziksel özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir. Portland çimentosu (OPC), kuru zemin kütlesinin %3, %6 ve %9 oranlarında karışıma eklenmiş olup, çimentoya ait ilgili özellikler Tablo 2'de sunulmuştur. Geri dönüştürülmüş lifler PET şişelerden ve LDPE poşetlerden elde edilmiştir; yaklaşık 10 ile 20 mm uzunluğunda ve 1 ile 3 mm genişliğinde kesilerek kuru zemin kütlesinin %0,25, %0,50 ve %0,75 oranlarında karışıma eklenmiştir.

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

Tablo 2. Kullanılan çimentonun kimyasal bileşimi (Haroon vd., 2026)

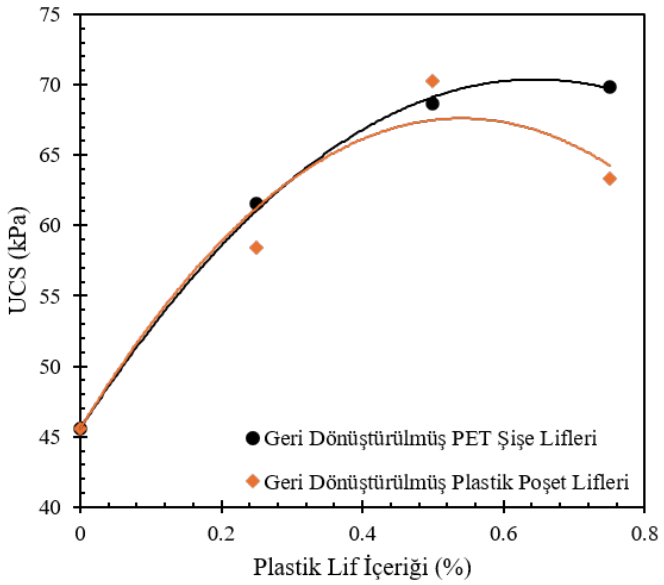
Oksit (%)	İçerik (%)
CaO	64,5
SiO_2	22,7
Al_2O_3	4,8
Fe_2O_3	3,9
MgO	0,3

Deneysel program üç aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada, PET şişe ve LDPE poşet liflerinin bireysel etkilerini değerlendirmek amacıyla işlem görmemiş ve lif donatılı numuneler hazırlanmıştır. İkinci aşamada, %3, %6 ve %9 çimento içeren numuneler kuru ve yaş karıştırma yöntemleriyle hazırlanmış ve üç, yedi ve on dört gün süreyle kür edilmiştir. Kuru karıştırma yönteminde, zemin ve çimento önce kuru halde homojen şekilde karıştırılmış, ardından %20 su içeriğine karşılık gelen su kademeli olarak eklenmiştir. Yaş karıştırma yönteminde ise aynı %20 su içeriği kullanılarak zemin önceden nemlendirilmiş, ardından çimento ilave edilmiştir. Yalnızca çimento içeren numunelerin 14 günlük UCS sonuçlarına dayanarak, sonraki çimento ve lif deneyleri için %3 çimento içeren kuru karıştırılmış numune seçilmiştir. Düşük çimento içerikli ve görece daha düşük başlangıç dayanımına sahip bu karışım, %0,25 ve %0,50 LDPE poşet lifi ile %0,25 ve %0,50 PET şişe lifi kullanılarak donatılmış ve 14 günlük kür süresi sonunda test edilmiştir. 50 milimetre çapında ve 100 milimetre yüksekliğinde silindirik numuneler, 1,90 g/cm^3 hedef hacimsel yoğunlukta statik sıkıştırma yöntemiyle hazırlanmıştır. Karışımlar kalıba üç tabaka halinde yerleştirilmiş ve belirlenen yoğunluğa ulaşacak şekilde sıkıştırılmıştır. Kalıptan çıkarıldıktan sonra numuneler, kür süresince nem kaybını en aza indirmek amacıyla plastik örtüyle sarılarak sızdırmaz şekilde muhafaza edilmiştir. Serbest basınç dayanımı (UCS) deneyleri, ASTM D2166 standardına uygun olarak, numune göçmesine kadar sabit %1/dakika eksenel deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen maksimum eksenel gerilme UCS değeri olarak kaydedilmiş, ayrıca deney sırasında gerilme ve şekil değiştirme davranışı ile göçme özellikleri gözlemlenmiştir. Her karışım koşulu için iki özdeş numune test edilmiş ve raporlanan UCS değerleri iki ölçümün ortalaması olarak verilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

İşlem görmemiş kontrol kilinin serbest basınç dayanımı (UCS) 45,57 kPa olarak belirlenmiştir. Geri dönüştürülmüş plastik liflerin eklenmesi, incelenen tüm lif türleri ve lif oranlarında UCS değerini artırmıştır. Bu sonuç, ayrık lif donatısının çimento stabilizasyonu olmadan bile doğal kilin yük taşıma kapasitesini artırabildiğini göstermektedir. Her iki geri dönüştürülmüş plastik kaynağı için UCS değerinin lif içeriğine göre değişimi Şekil 1'de sunulmuştur. Geri dönüştürülmüş PET şişelerden elde edilen liflerde UCS değeri, kontrol numunesinde 45,57 kPa iken, %0,25, %0,50 ve %0,75 lif içeriklerinde sırasıyla 61,52, 68,67

ve 69,87 kPa'ya yükselmiştir. Bu değerler kontrol numunesine göre yaklaşık %35,0, %50,7 ve %53,3 dayanım artışına karşılık gelmektedir. Şekil 1'de görüldüğü gibi, lif içeriğinin %0'dan %0,50'ye yükseltilmesiyle dayanımda belirgin bir artış meydana gelirken, lif oranının %0,50'den %0,75'e çıkarılması yalnızca sınırlı bir ek artış sağlamıştır. Bu eğilim, PET liflerinin donatı etkinliğinin yüksek lif oranlarında plato seviyesine ulaştığını göstermektedir. Geri dönüştürülmüş plastik poşetlerden elde edilen liflerde ise farklı bir eğilim gözlenmiştir. UCS değeri %0,25 lif içeriğinde 58,46 kPa'ya yükselmiş ve %0,50 lif içeriğinde 70,28 kPa ile maksimum değere ulaşmıştır. Bu değerler kontrol numunesine göre sırasıyla yaklaşık %28,3 ve %54,2 dayanım artışına karşılık gelmektedir. Lif içeriğinin %0,75'e çıkarılması UCS değerini 63,35 kPa'ya düşürmüş olmakla birlikte, bu değer kontrol numunesinden yaklaşık %39,0 daha yüksektir. Bu nedenle, Şekil 1'de %0,50 lif içeriğinde gözlenen tepe noktası, incelenen aralıkta geri dönüştürülmüş plastik poşet lifleri için belirgin bir optimum lif oranını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, lif içeriğindeki artışın basınç dayanımında her zaman orantılı bir artışa neden olmadığını göstermektedir. Düşük ve orta seviyedeki lif oranlarında rastgele dağılmış lifler, çevresindeki zemin matrisiyle etkileşime girerek gerilme aktarımını artırabilir ve deformasyonu sınırlandırabilir. Öte yandan, aşırı lif içeriğinde lifler arası etkileşim, homojen olmayan dağılım veya yerel boşlukların oluşması donatı etkinliğini azaltabilir. Bu tür etkiler, %0,75 plastik poşet lifi içeren numunede gözlenen dayanım azalmasına katkıda bulunmuş olabilir. Ancak, bu mekanizmanın doğrulanabilmesi için doğrudan mikroyapısal incelemelere ihtiyaç vardır. Şekil 1'de iki farklı lif kaynağının karşılaştırılması, donatı etkinliğinin hem lif türüne hem de lif oranına bağlı olduğunu göstermektedir. PET şişe lifleri %0,25 ve %0,75 oranlarında daha yüksek UCS değerleri sağlarken, geri dönüştürülmüş plastik poşet lifleri %0,50 oranında lif katkılı numuneler arasında en yüksek UCS değerini vermiştir. Bununla birlikte, iki farklı lif kaynağından elde edilen maksimum dayanımlar birbirine oldukça yakın olup, PET şişe lifleri için 69,87 kPa, plastik poşet lifleri için ise 70,28 kPa olarak belirlenmiştir.



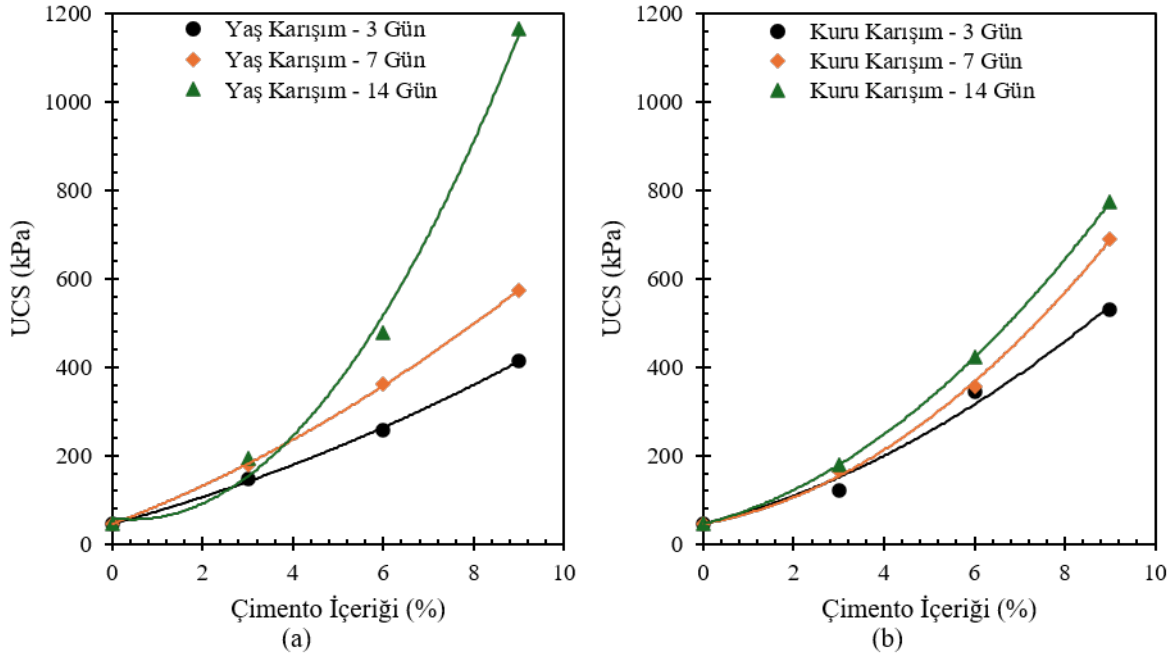
Şekil 1. PET şişe ve plastik poşet kökenli geri dönüştürülmüş lifler için serbest basınç dayanımının lif içeriğine bağlı değişimi.

Çimento stabilizasyonu, yalnızca lif donatısına kıyasla UCS'de çok daha belirgin artışlar sağlamıştır. Her iki numune hazırlama yönteminde de çimento içeriğinin artması genel olarak dayanımda önemli artışlara yol açarken, kür süresinin uzaması mekanik performansı

daha da geliştirmiştir. Ancak, kür süresine bağlı dayanım gelişiminin büyüklüğü hem çimento dozajına hem de karıştırma yöntemine önemli ölçüde bağlıdır. Yaş ve kuru karıştırma yöntemiyle hazırlanan çimento ile stabilize edilmiş numunelerin UCS gelişimi sırasıyla Şekil 2(a) ve Şekil 2(b)'de sunulmuştur. Yaş karıştırma yöntemiyle hazırlanan numunelerde, üç günlük UCS değeri %3 çimento içeriğinde 147,50 kPa iken, %6 ve %9 çimento içeriklerinde sırasıyla 257,65 kPa ve 414,75 kPa'ya yükselmiştir. Yedi günlük kür süresi sonunda karşılık gelen dayanım değerleri sırasıyla 178,55, 360,85 ve 573,40 kPa olarak belirlenmiştir. Çimento içeriğinin etkisi 14 günlük kür süresi sonunda daha belirgin hale gelmiş ve %3, %6 ve %9 çimento içerikleri için sırasıyla 193,90, 476,70 ve 1165,50 kPa UCS değerleri elde edilmiştir (Şekil 2(a)). Kür süresinin etkisi, çimento içeriğinin artmasıyla birlikte giderek daha belirgin hale gelmiştir. Yaş karıştırma yöntemiyle hazırlanan numunelerde, üç ile 14 gün arasında UCS değeri %3 çimento içeriğinde yaklaşık %31,5, %6 çimento içeriğinde %85,0 ve %9 çimento içeriğinde %181,0 artmıştır. Bu nedenle, Şekil 2(a)'da görülen giderek dikleşen dayanım gelişim eğrileri, kür süresinin etkisinin özellikle yüksek çimento dozajlarında daha belirgin olduğunu göstermektedir. Kuru karıştırma yöntemiyle hazırlanan numunelerde de çimento içeriği ile UCS arasında benzer bir genel ilişki gözlenmiştir (Şekil 2(b)). Üç günlük kür süresi sonunda %3, %6 ve %9 çimento içerikleri için sırasıyla 122,30, 344,85 ve 529,40 kPa UCS değerleri elde edilmiştir. Bu değerler 7 gün sonunda sırasıyla 163,60, 357,25 ve 690,10 kPa'ya, 14 gün sonunda ise 178,70, 422,10 ve 772,85 kPa'ya yükselmiştir. Bununla birlikte, yaş karıştırma yöntemiyle karşılaştırıldığında, kür süresinin uzamasıyla meydana gelen dayanım artışı kuru karıştırılmış numunelerde genel olarak daha sınırlı kalmıştır. 3 ile 14 gün arasında UCS değerleri %3, %6 ve %9 çimento içerikleri için sırasıyla yaklaşık %46,1, %22,4 ve %46,0 artmıştır. Özellikle, %9 çimento içeren kuru karıştırılmış numunenin Şekil 2(b)'deki nispeten düşük eğimli dayanım gelişimi, karşılık gelen yaş karıştırılmış numunede 7 ile 14 gün arasında gözlenen hızlı dayanım artışıyla belirgin bir karşıtlık göstermektedir. Çimento içeriği ve kür süresinin artmasıyla UCS değerinde gözlenen genel artış, stabilize edilmiş zemin matrisi içerisinde çimentolu bağların zamanla gelişmesiyle uyumludur. Kür süresi ilerledikçe çimentolu reaksiyon ürünlerinin oluşumu ve gelişimi, zemin taneleri arasındaki bağları güçlendirerek eksenel deformasyona karşı direnci artırmaktadır. İki farklı karıştırma yöntemi arasında gözlenen belirgin kür davranışı farklılıkları ise başlangıçtaki numune hazırlama koşullarının çimento ile stabilize edilmiş matrisin sonraki gelişimini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

Şekil 3, yaş ve kuru karıştırma yöntemleriyle hazırlanan çimento ile stabilize edilmiş numunelerin işlem görmemiş kile kıyasla sağladığı dayanım artışlarını göstermektedir. %3 çimento içeriğinde, yaş karıştırılmış numuneler için 3, 7 ve 14 günlük kür sürelerinde sırasıyla yaklaşık %224, %292 ve %326 oranlarında dayanım artışı gözlenmiştir. Kuru karıştırılmış numunelerde ise bu değerler %168, %259 ve %292 olarak belirlenmiştir (Şekil 3(a)). Sonuçlar, düşük çimento içeriğinde yaş karıştırma yönteminin tüm kür sürelerinde daha yüksek dayanım artışı sağladığını ortaya koymuştur. %6 çimento içeriğinde ise karıştırma yönteminin etkisi kür süresine bağlı olarak değişiklik göstermiştir (Şekil 3(b)). Üç günlük kür sonunda kuru karıştırma yöntemiyle yaklaşık %657, yaş karıştırma ile ise %465 oranında dayanım artışı elde edilmiştir. Yedi günlük kürde iki yöntem çok benzer sonuçlar vermiştir (%684 ve %692). On dört günlük kür sonunda ise yaş karıştırmanın dayanım artışı %946'ya ulaşarak kuru karıştırmada elde edilen %826 değerinin üzerine çıkmıştır. Benzer fakat daha belirgin bir değişim %9 çimento içeriğinde gözlenmiştir (Şekil 3(c)). Kuru karıştırılmış numunelerde, 3 ve 7 günlük kür sonunda sırasıyla yaklaşık %1062 ve %1415 oranlarında dayanım artışı elde edilmiştir. Yaş karıştırılmış numunelerde ise aynı sürelerde bu değerler %810 ve %1158 olmuştur. Öte yandan, 14 günlük kür sonunda yaş

karıştırılmış numunenin dayanım artışı %2458'e ulaşarak, kuru karıştırılmış numunedeki %1596 değerini belirgin şekilde aşmıştır. Genel olarak, kuru karıştırma yöntemi orta ve yüksek çimento içeriklerinde erken dönemde daha yüksek dayanım artışı sağlarken, uzun kür süresinde yaş karıştırmanın avantajı öne çıkmıştır ve bu etki özellikle %9 çimento içeriğinde en yüksek düzeye ulaşmıştır.

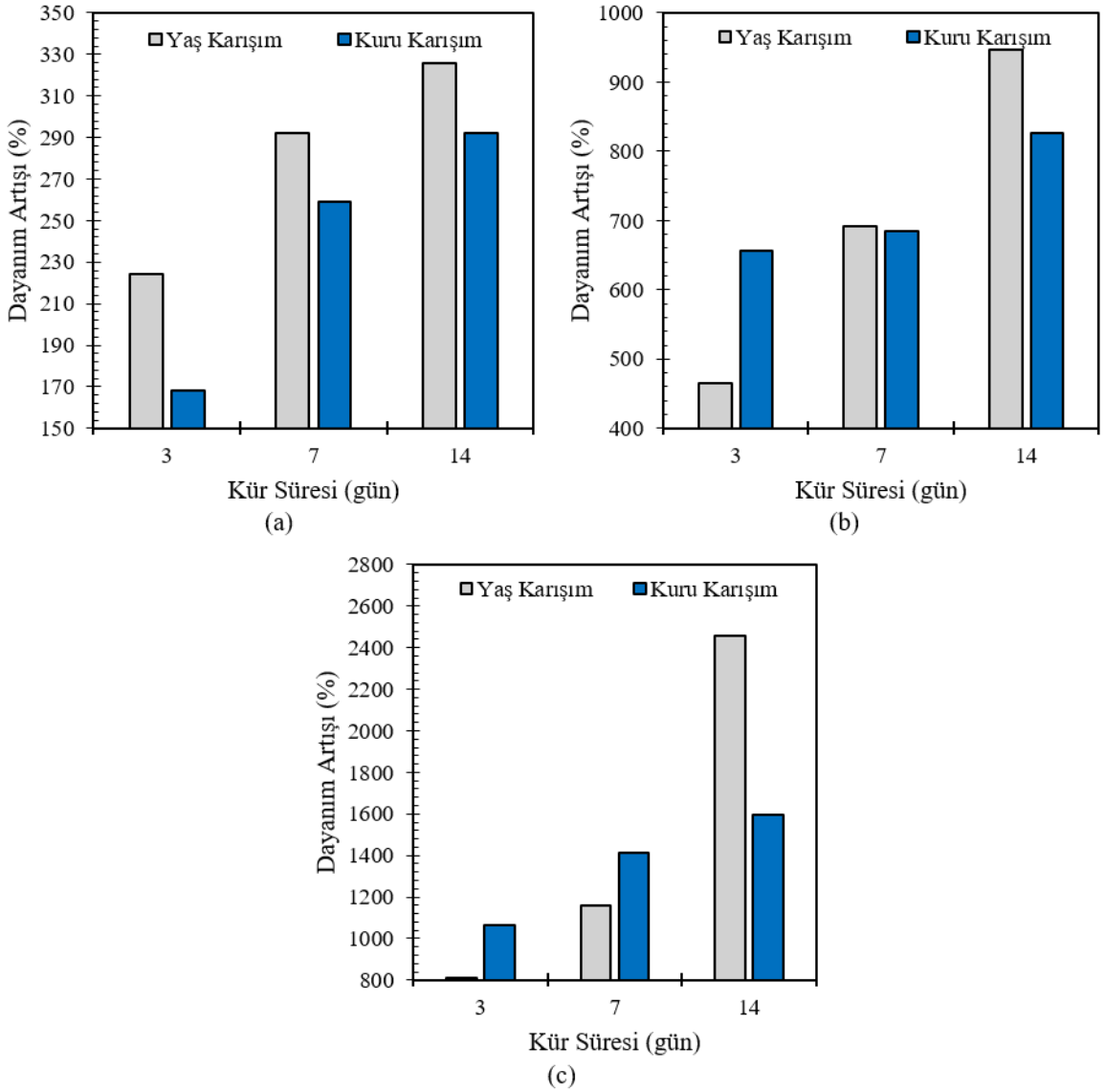


Şekil 2. Farklı çimento içeriklerinde kür süresine bağlı serbest basınç dayanımının gelişimi: (a) yaş karıştırma ve (b) kuru karıştırma yöntemiyle hazırlanan numuneler.

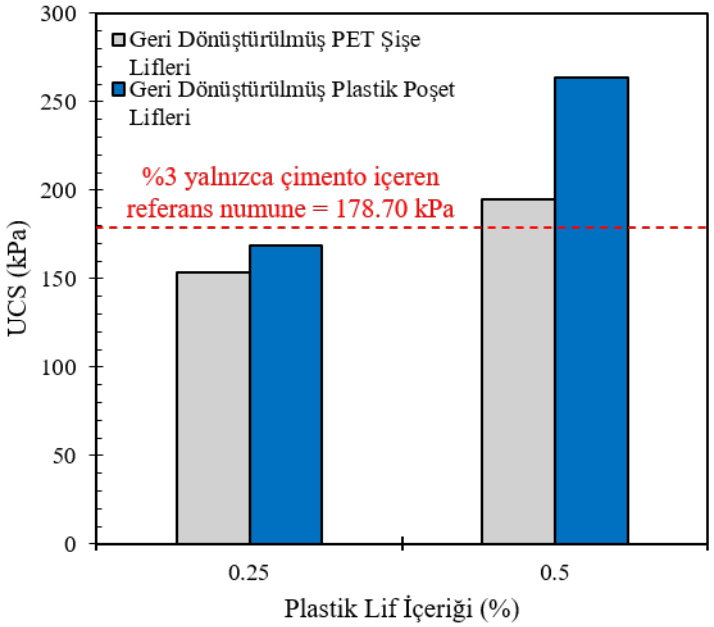
Genel olarak, Şekil 2 ve Şekil 3'teki sonuçlar, çimento ile stabilize edilmiş kilin UCS davranışının çimento içeriği, kür süresi ve karıştırma yönteminin ortak etkilerine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Kuru karıştırma, orta ve yüksek çimento içeriklerinde erken dönemde avantaj sağlarken, kür süresi arttıkça yaş karıştırma yöntemi daha etkili olmuştur ve bu etki özellikle %9 çimento içeriğinde belirginleşmiştir. Sonuç olarak, karıştırma yöntemi, çimento dozajı ve kür süresiyle birlikte değerlendirilmesi gereken önemli bir hazırlama parametresi olarak öne çıkmaktadır.

14 günlük yalnızca çimento içeren numunelerin UCS sonuçlarına dayanarak, lif donatısı uygulanacak karışım olarak %3 çimento içeren kuru karıştırılmış numune seçilmiştir. On dört günlük kür süresi sonunda, %3, %6 ve %9 çimento içeren kuru karıştırılmış numunelerde sırasıyla 178,70, 422,10 ve 772,85 kPa UCS değerleri elde edilmiştir. Bu nedenle, çimento tüketimini artırmadan geri dönüştürülmüş liflerin ek dayanım sağlayıp sağlayamayacağını değerlendirmek için %3 çimento içeren karışım düşük çimento içerikli referans karışım olarak seçilmiştir. Ayrıca, kuru karıştırma yöntemi 14 günlük kür sonunda tüm çimento içeriklerinde yaş karıştırmaya kıyasla daha düşük UCS değerleri verdiğinden, nispeten daha muhafazakâr bir hazırlama koşulu olarak benimsenmiştir. Şekil 4'te görüldüğü gibi, %0,25 lif ilavesi çimento içeren referans numuneye kıyasla UCS değerinde azalmaya neden olmuştur. Plastik poşet ve şişe kökenli lifler sırasıyla 153,40 ve 168,40 kPa UCS değerleri vermiştir ve bu değerler referans numuneye göre yaklaşık %14,2 ve %5,8 oranında azalmaya karşılık gelmektedir. Buna karşılık, lif oranının %0,50'ye yükseltilmesi dayanım davranışını iyileştirmiştir. UCS değeri plastik poşet kökenli liflerde 194,60 kPa'ya, şişe

kökenli liflerde ise 263,75 kPa'ya yükselmiştir. Bu değerler, yalnızca çimento içeren referans numuneye kıyasla sırasıyla yaklaşık %8,9 ve %47,6 dayanım artışına karşılık gelmektedir. Sonuçlar, geri dönüştürülmüş liflerin çimento ile stabilize edilmiş kil üzerindeki katkısının lif oranına ve lif türüne önemli ölçüde bağlı olduğunu göstermektedir. Düşük lif oranı UCS değerini artırmak için yeterli olmazken, %0,50 lif içeriği olumlu bir donatı etkisi sağlamıştır. En yüksek performans %0,50 şişe kökenli lif içeren numunede elde edilmiştir ve bu durum, söz konusu lif oranında daha etkin bir lif ile matris etkileşimine işaret etmektedir. Genel olarak bulgular, uygun tür ve oranda seçilen geri dönüştürülmüş liflerin, yalnızca çimento dozajını artırmaya gerek kalmadan, nispeten düşük çimento içerikli bir karışımın dayanımını geliştirebileceğini göstermektedir.



Şekil 3. Yaş ve kuru karıştırma yöntemlerinin işlem görmemiş kile göre dayanım artışı açısından karşılaştırılması: (a) %3, (b) %6 ve (c) %9 çimento içeriği.



Şekil 4. 14 gün kürlenmiş, %3 çimento içeren kuru karıştırılmış kil numunelerinde geri dönüştürülmüş plastik lif türü ve lif içeriğinin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, geri dönüştürülmüş plastik lif donatısı, çimento oranı, kür süresi ve karıştırma yönteminin killi zeminin serbest basınç dayanımı (UCS) üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda şu bulgular elde edilmiştir:

- Geri dönüştürülmüş plastik lifler, doğal kilin UCS değerini artırmıştır. Ancak elde edilen iyileşmenin lifin türüne ve oranına göre değiştiği anlaşılmıştır. İşlem görmemiş zeminin UCS değeri 45,57 kPa iken, yalnızca lif içeren numunelerde elde edilen en yüksek UCS değerleri %0,75 PET şişe lifi için 69,87 kPa ve %0,50 LDPE poşet lifi için 70,28 kPa olmuştur.

- Çimento stabilizasyonu dayanımı önemli ölçüde artırmıştır. UCS değerleri, çimento oranı ve kür süresi arttıkça genel olarak yükselmiştir. En yüksek UCS, %9 çimento içeren ve 14 gün kürlenen yaş karıştırılmış numunede 1165,50 kPa olarak ölçülmüştür.

- Karıştırma yönteminin etkisi hem çimento oranına hem de kür süresine bağlı olarak değişmiştir. Kuru karıştırma, orta ve yüksek çimento içeriklerinde erken yaşta daha yüksek dayanım sağlarken, yaş karıştırma yöntemi 14 günlük kür sonunda tüm çimento oranlarında daha yüksek UCS değerleri üretmiştir. Bu uzun vadeli avantaj özellikle %9 çimento içeriğinde belirginleşmiştir.

- Yalnızca çimento içeren numunelerin 14 günlük sonuçlarına göre, lif donatısı uygulamaları için düşük çimento içerikli referans olarak %3 çimento içeren kuru karıştırılmış numune seçilmiştir. %0,25 lif içeriğinde hem LDPE hem de PET lifleri, yalnızca çimento içeren referans numuneye kıyasla UCS değerini azaltırken, %0,50 lif içeriğinde dayanımda artış gözlenmiştir.

- En etkili çimento ve lif kombinasyonu, %3 çimento ile %0,50 PET şişe lifi olarak belirlenmiştir. Bu karışımda UCS değeri 178,70 kPa'dan 263,75 kPa'ya yükselmiş ve yaklaşık %47,6 oranında dayanım artışı sağlanmıştır. Sonuçlar, geri dönüştürülmüş plastik liflerin ek çimento kullanımını sınırlarken düşük çimento içerikli stabilize killerin mekanik performansını artırma potansiyelini ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

Abou Diab, A., Najjar, S.S., Sadek, S., Taha, H., Jaffal, H. ve Alahmad, M. (2018), "Effect of Compaction Method on the Undrained Strength of Fiber-Reinforced Clay", Soils and Foundations, Vol. 58, No. 2, 462–480.

Bozyigit, I., Bulbul, F., Alp, C. ve Altun, S. (2021), "Effect of Randomly Distributed PET Bottle Strips on Mechanical Properties of Cement Stabilized Kaolin Clay", Engineering Science and Technology, an International Journal, Vol. 24, No. 5, 1090–1101.

Fatahi, B., Khabbaz, H. ve Fatahi, B. (2012), "Mechanical Characteristics of Soft Clay Treated with Fibre and Cement", Geosynthetics International, Vol. 19, No. 3, 252–262.

Haider, A.B., Iravanian, A., Selman, M.H. ve Ekinci, A. (2023), "Using Waste PET Shreds for Soil Stabilization: Efficiency and Durability Assessment", International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, Vol. 9, 48.

Haroon, M.U., Saeed, H. ve Ekinci, A. (2026), "Balancing Strength, Durability, and Environmental Impacts in Sewage-Sludge-Modified Cemented Clay", Reviews on Advanced Materials Science, Vol. 65, No. 1.

Mishaal, F.Z. ve Aldaood, A. (2025), "Strength of Silty Soil Treated with Cement and Reinforced with Plastic Bottle Waste under Conventional and Wetting-Drying Conditions", Soils and Rocks, Vol. 48, No. 2, e2025010723.

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.

Shu, B., Gong, H., Chen, S., Ren, Y., Li, Y., Yang, T., Zeng, G., Zhou, M., Barbieri, D.M. ve Li, Y. (2022), "Case Study of Solid Waste Based Soft Soil Solidifying Materials Applied in Deep Mixing Pile", Buildings, Vol. 12, No. 8, 1193.

Zhao, J., Zong, Z., Cen, H. ve Jiang, P. (2024), "Analysis of Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Soil Cement Based on Kaolin", Materials, Vol. 17, No. 9, 2153.