CONFERENCE BOOK

EGE 14. ULUSLARARASI UYGULAMALI BİLİMLER KONGRESİ

İZMİR

23 - 29 ARALIK 2025

EGE
14. ULUSLARARASI UYGULAMALI BİLİMLER KONGRESİ

EGE

14TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES

DECEMBER 23 - 29, 2025

IZMIR

Cilt 3

ISBN : 978-625-5694-65-2

Academy Global Publishing House

EGE 14TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES
DECEMBER 23 - 29, 2025
IZMIR

Edited By
PROF. DR. HÜLYA ÇİÇEK

Issued: 30.12.2025
ISBN: 978-625-5694-65-2

ASSOCIATION & ACADEMIC INCENTIVES :
In the conference 427 papers have been presented by Turkish participants and 444 papers by foreign participants.
Members of the organizing committees of the conference perform their duties with an "official assignment letter"

All rights of this book belong to Academy Global Publishing House
Without permission can't be duplicate or copied.
Authors of chapters are responsible both ethically and juridically.
Academy Global–2025©

CONFERENCE ID

EGE 14TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES

DATE – PLACE

DECEMBER 23 - 29, 2025

IZMIR

ORGANIIZATION

ACADEMY GLOBAL CONFERENCES & JOURNALS

EVALUATION PROCESS

All applications have undergone a double-blind peer review process.

PARTICIPATING COUNTRIES

Turkey – Iran – Mongolia – Georgia – India- Tanzania- Hungary – Malaysia- - Tunisia- Tajikistan- Germany -Japan – Serbia- Egypt – Algeria- Lebanon- Saudi Arabia – Cambodia – Spain- Kyrgyzstan – Albania – Pakistan- Russia- Kenya- North Macedonia- Kazakhstan – Indonesia – Bangladesh – Greece – Moldova – Nigeria – China - Oman – Philippines – Azerbaijan – Dubai - , Ethiopia – Qatar – Vietnam-

-

PRESENTATION

Oral presentation

ISBN NR: 978-625-5694-65-2

SIVILAŞTIRILMIŞ PET ATIKLARIYLA İYİLEŞTİRİLEN KİL ZEMİNLERİN KIVAM LİMİTLERİ VE DONMA-ÇÖZÜLME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Yük. İnş. Müh. Namenur İBİŞ

Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum,

namenuribis@gmail.com, ORCID ID 0000-0002-6737-466X

Dr. Fatih ARTUK*

Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum,

fatih.artuk@atauni.edu.tr, ORCID ID 0000-0003-4798-9277

Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAİMOĞLU

Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum,

zaimoglu@atauni.edu.tr, ORCID ID 0000-0001-5245-0212

Prof. Dr. Meral OLTULU

Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum,

mroltulu@atauni.edu.tr, ORCID ID 0000-0002-3779-6888

ÖZET

Günümüzde hızla artan plastik tüketimi, özellikle polietilen tereftalat (PET) şişe atıkları, çevresel sürdürülebilirlik açısından ciddi bir sorun oluşturmaktadır. Uzun yıllar doğada bozunmadan kalabilen bu atıkların geri kazanımı, yalnızca atık yönetimi açısından değil, aynı zamanda doğal kaynak tüketiminin azaltılması ve karbon ayak izinin düşürülmesi açısından da önem taşımaktadır. Bu bağlamda, atık malzemelerin geoteknik mühendisliğinde alternatif iyileştirme malzemesi olarak değerlendirilmesi, sürdürülebilir zemin mühendisliği uygulamalarının gelişimine katkı sağlamaktadır. Bu çalışma, sıvılaştırılmış PET şişe atıklarının ince taneli kil zeminlerin kıvam özellikleri ile donma-çözülme çevrimleri altındaki davranışı üzerindeki etkisini incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında yüksek plastisiteli bir kil zemine, sıvılaştırılmış PET atıkları farklı oranlarda (%5, %10, %15 ve %20) ilave edilerek katkılı zemin numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde Atterberg limitleri deneyleri gerçekleştirilerek katkının zeminin kıvam özellikleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Ayrıca, seçilen katkı oranları için 0, 1, 3, 5, 10 ve 15 çevrim olacak şekilde donma-çözülme deneyleri uygulanmış ve çevrim sayısının artışıyla zemin davranışındaki değişimler incelenmiştir. Deney sonuçları, sıvılaştırılmış PET katkısının genel olarak zemin sınıfını önemli ölçüde değiştirmediğini, ancak plastik limit ve plastisite indisinde katkı oranına ve ekleniş biçimine bağlı değişimler oluşturduğunu göstermiştir. Donma-çözülme deneyleri sonucunda ise çevrim sayısının artmasıyla dayanım kayıpları gözlenmiş olmakla birlikte, %10 ve %20 katkı oranlarının donma-çözülmeye karşı daha olumlu bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, sıvılaştırılmış PET atıklarının soğuk iklim koşullarında kil zeminlerin çevreci ve sürdürülebilir şekilde iyileştirilmesinde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

ISBN NR: 978-625-5694-65-2

Anahtar Kelimeler: Sıvılaştırılmış PET atıkları, kil zemin, kıvam limitleri, donma-çözülme, sürdürülebilir zemin iyileştirmesi

INVESTIGATION OF ATTERBERG LIMITS AND FREEZE–THAW BEHAVIOR OF CLAY SOILS IMPROVED WITH LIQUEFIED PET WASTE

ABSTRACT

The rapid increase in plastic consumption in recent years, particularly polyethylene terephthalate (PET) bottle waste, poses a serious challenge in terms of environmental sustainability. The recycling of these wastes, which can persist in the natural environment for long periods without degradation, is important not only for effective waste management but also for reducing natural resource consumption and lowering the carbon footprint. In this context, the utilization of waste materials as alternative improvement agents in geotechnical engineering contributes to the advancement of sustainable soil engineering practices. This study aims to investigate the effects of liquefied PET bottle waste on the Atterberg limits and freze-thaw behavior of fine-grained clay soils. Within the scope of the study, soil samples were prepared by adding liquefied PET waste to a high-plasticity clay soil at different proportions (5%, 10%, 15%, and 20%). Atterberg limits tests were conducted to evaluate the influence of the additive on the consistency properties of the soil. In addition, freze-thaw tests were performed for selected additive ratios under 0, 1, 3, 5, 10, and 15 cycles, and the changes in soil behavior with increasing cycle numbers were examined. The experimental results indicated that the addition of liquefied PET waste did not significantly alter the soil classification; however, variations in the plastic limit and plasticity index were observed depending on the additive content and the method of incorporation. Although a general reduction in strength was observed with increasing freeze–thaw cycles, the results demonstrated that additive ratios of 10% and 20% exhibited a more favorable response to freze-thaw conditions. The findings of this study suggest that liquefied PET waste can be considered an environmentally friendly and sustainable alternative material for improving clay soils exposed to cold climate conditions.

Keywords: Liquefied PET waste, clay soil, atterberg limits, freze-thaw, sustainable soil improvement

1. GİRİŞ

Taşıyıcı eleman olarak kullanılan zemin ortamları, mekanik ve fiziksel özellikleri bakımından her zaman mühendislik uygulamalarının gerektirdiği nitelikleri sağlayamamaktadır. Bu nedenle tarih boyunca zeminlerin istenilen özellikleri kazanabilmesi amacıyla farklı iyileştirme yöntemleri geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Günümüzde ise zemin iyileştirme yaklaşımları, yalnızca mühendislik performansının artırılmasına değil; aynı zamanda çevreye zarar veren, depolama alanlarını sınırlayan ve sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle çelişen atıkların değerlendirilmesine odaklanan bütüncül bir anlayış doğrultusunda gelişmektedir. Bu kapsamda, endüstriyel, tarımsal ve plastik esaslı atıkların zemin iyileştirmede kullanılabilirliğine yönelik çok sayıda çalışma literatürde yer almaktadır.

Atık malzemelerin zemin davranışı üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalarda; lif, mineral ve polimer esaslı katkıların özellikle dayanım, dayanıklılık ve deformasyon özelliklerini iyileştirdiği ifade edilmiştir. İnce taneli zeminlerin donma-çözülme çevrimleri altındaki

ISBN NR: 978-625-5694-65-2

davranışını polipropilen lif katkısı ile inceleyen Akbulut ve Zaimoğlu (2019), artan lif içeriğiyle serbest basınç mukavemetinde belirgin artışlar elde edildiğini göstermiştir. Öğütülmüş atık gaz beton katkısının farklı zemin türleri üzerindeki etkilerini araştıran Alpyürür ve Şenol (2018), bu atığın zemin iyileştirmede kullanılabilir olduğunu belirtmiştir. İnşaat yıkıntı atıkları, kireç ve kaolin katkılarının kaolin kilinin taşıma gücü üzerindeki etkisini inceleyen Vural (2018), artan katkı oranlarıyla CBR değerlerinde anlamlı artışlar elde etmişlerdir. Sıvı hâlde melamin formaldehit polimer katkısının kaolin kile uygulanmasıyla kür süresi sonunda dayanımda ciddi artışlar sağlandığı Saygılı (2018) tarafından ortaya konmuştur. Biyolojik iyileştirme yaklaşımları kapsamında Lim vd. (2020), Rhizopus oligosporus kullanımının gevşek kum zeminlerde kesme mukavemetini artırdığını göstermiştir. Plastik, cam tozu ve e-atıkların birlikte değerlendirildiği çalışmalarda ise bu atıkların zemin iyileştirme açısından etkili alternatifler sunduğu belirtilmiştir (Rai vd., 2020). Ayrıca uçucu kül, polisaj ve kireç katkılarının kil zeminlerin mukavemetini artırdığı da literatürde vurgulanmaktadır (Öntürk, 2011).

Son yıllarda atık miktarında önemli artış görülen polietilen tereftalat (PET) şişeler, sürdürülebilir zemin iyileştirme yaklaşımları açısından öne çıkan malzemelerden biridir. PET esaslı katı atıkların, dünyadaki toplam katı atık miktarının ağırlıkça %5-9'unu ve hacimce %15-20'sini oluşturduğu bildirilmektedir (Sevencan ve Vaizoğlu, 2007). Türkiye'de yıllık yaklaşık 165 bin ton PET şişe üretilmesine karşın bunun yalnızca 40 bin tonunun geri dönüştürülebildiği; doğaya karışan PET şişelerin yıllık ekonomik değerinin yaklaşık 70 milyon dolar olduğu belirtilmektedir (Tayyar ve Üstün, 2010). Bu durum, PET atıklarının alternatif ve katma değerli kullanım alanlarının geliştirilmesini çevresel ve ekonomik açıdan zorunlu hâle getirmektedir.

Literatür incelendiğinde PET atıklarının büyük ölçüde katı formda değerlendirildiği görülmektedir. Katı PET ve mermer tozu katkılı betonların olumlu performans sergilediği Çınar (2016) tarafından; asfalt betonunda agrega yerine katı PET kullanımının doğal kaynak tüketimini önemli ölçüde azalttığı ise Hassani vd. (2005) tarafından rapor edilmiştir. Katı PET atıklarının sıcak asfalt karışımlarında deformasyona karşı direnci artırdığı Movilla-Quesada vd. (2019) tarafından gösterilmiştir. Geoteknik uygulamalarda Farah (2015), katı plastik şişe katkısının kumda içsel sürtünme açısını artırdığını, kil zeminlerde ise serbest basınç mukavemetini azalttığını belirtmiştir. PET ve Polipropilen elyaflarının killi zeminlerin stabilizasyonunda başarılı biçimde kullanılabileceği Zukri vd. (2017) tarafından; atık plastiklerin bertaraf problemlerine çözüm sunduğu ise Peddaiah vd. (2018) tarafından vurgulanmıştır. Polietilen atık katkısının sıkıştırma özelliklerini iyileştirdiği ve deformasyonları azalttığı da Ilieş vd. (2017) tarafından ortaya konmuştur.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, PET atıklarının farklı formlarda kullanılmasıyla elde edilen nicel iyileşmeleri daha ayrıntılı biçimde ortaya koymuştur. Chandra ve Siddiqua (2023), kimyasal olarak depolimerize edilmiş PET türevi BHET katkısının kum-bentonit karışımlarında likit ve plastik limitleri belirgin biçimde artırdığını ve şişme değerinde ise azalma sağlandığını ifade etmiştir. Parçalanmış PET katkısının siltli kil zeminlerde etkisini inceleyen Urian vd. (2023), %2-4 PET katkısı ile kesme dayanımında artışlar elde edildiğini, ancak daha yüksek oranlarda olumsuz etkiler görüldüğünü bildirmiştir. PET parçacıklarının geri dolgu zeminlerinde kullanımını araştıran Sheikh vd. (2023), %1 PET katkısı ve küçük parçacık

ISBN NR: 978-625-5694-65-2

boyutlarında içsel sürtünme açısının arttığını ortaya koymuştur. Islanma-kuruma çevrimleri altında PET şerit ve çimento kombinasyonunu inceleyen Haider vd. (2023), optimum PET oranının %0,6-0,8 aralığında olduğunu ve çevrimler boyunca rijitlik kaybının önemli ölçüde azaldığını ifade etmişlerdir. Ayrıca PET atıklarının kolon tipi iyileştirme elemanı olarak da kullanılabileceği ve bu yöntemle kayma dayanımında %20-55 aralığında artışlar elde edilebildiği Shen ve Hasan (2025) tarafından gösterilmiştir. PET atıklarının farklı bağlayıcılarla birlikte sinerjik etkiler oluşturabildiği ve bu sayede serbest basınç mukavemetinin önemli ölçüde artırılabildiği de Khalid ve Alshawmar (2023) tarafından belirlenmiştir.

Görüldüğü üzere, literatürde PET atıkları; zemin iyileştirmede, beton ve asfalt uygulamalarında ağırlıklı olarak katı formda kullanılmış; buna karşılık sıvılaştırılmış PET atıklarının zeminlerin fiziksel özellikleri ve donma-çözülme çevrimleri altındaki davranışı üzerindeki etkileri yeterince araştırılmamıştır. Bu çalışmada, literatürdeki bu boşluğu doldurmak amacıyla atık PET şişelerin sıvılaştırılarak kullanılması ele alınmıştır. Bu kapsamda sıvılaştırılmış PET şişe atıkları, doğal kil zemine farklı oranlarda (%5, %10, %15 ve %20) ilave edilmiş; kil zeminin kıvam limitleri ve donma-çözülme çevrimleri sonrası davranışı incelenmiştir. PET atıklarının bu şekilde değerlendirilmesi, hem yeni bir kullanım alanı sunmakta hem de çevreci ve sürdürülebilir bir zemin iyileştirme yaklaşımı ortaya koymaktadır. Kullanılan malzemeler, karışım oranları ve üretim yöntemi dikkate alındığında, çalışmanın literatürde öncü nitelikte olduğu ve ileride yapılacak çalışmalara ışık tutacağı değerlendirilmektedir.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

2.1 Kil

Çalışmada kullanılan kil Erzurum' un Kuzeydoğusunda yer alan Oltu ilçesinden temin edilmiştir. Araziden alınan kil malzemesi Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda kurutulup, danelendikten sonra temel fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Kullanılan doğal kile ait görsel Görsel 1'de, özellikleri ise Tablo 1'de verilmiştir.

Görsel 1. Doğal Kil

Çizelge 1. Doğal Kile Ait Özellikler

Özellik	Değer
Likit limit (%)	77
Plastik limit (%)	31
Plastisite indisi (%)	46
Optimum su içeriği (%) *	21
Maksimum yoğunluk (gr/cm³) *	1,55

ISBN NR: 978-625-5694-65-2

Özellik	Değer
Zemin Sınıfı **	CH

*Standart Proktor; ** USCS

2.2. PET Şişe Atıkları

Çalışmada kullanılan PET şişe atıkları farklı yerlerden atık olarak toplanmış ve laboratuvarda küçük parçacıklara ayrılmıştır (Görsel 2).

Görsel 2. Parçalara ayrılan PET şişe atığı

2.3. Tricholoroacetic Acid ve Dicholoromethane Kimyasalları

Çalışmada kullanılan tricholoroacetic acid ve dicholoromethane kimyasalları özel bir firmadan temin edilmiştir. Kimyasallara ait görüntüler Görsel 3a-b'de, temin edilen firmadan alınan bazı özellikleri ise Çizelge 2'de verilmiştir.

Görsel 3. (a) Tricholoroacetic acid. (b) Dicholoromethane

Çizelge 2. Kimyasalların Firmadan Alınan Bazı Özellikleri

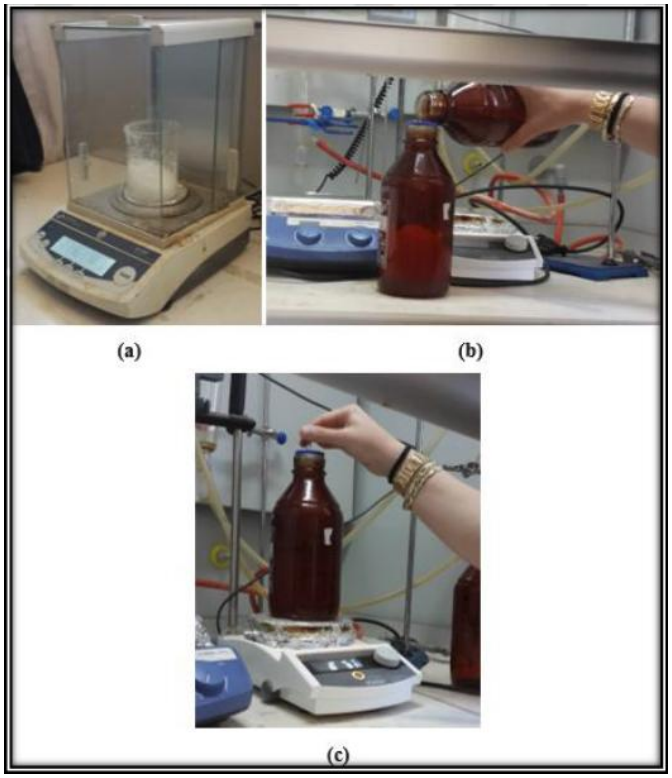
Ürün Adı	Kimyasal Formül	CAS No.	Formül Ağırlığı/ Yoğunluk	Asidimetrik	Saflık	Görünüş
Tricholoroacetic Acid, for analysis ACS, Reag. Ph Eur.	$C_2HCl_3O_2$	76-03-9	163,38 g/mol	≥99,5%	-------	--------
Dicholoromethane, Extra püre	CH_2Cl_2	75-09-2	1,31-1,33 gr/cm^3	≤0,0005 meq/gr	≥99,5%	Clear /Berrak

2.4. Sıvılaştırılmış Atık PET Şişe Üretimi

Sıvılaştırılmış atık PET şişe üretimi Bingöl Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. PET şişe atıklarından sıvılaştırılmış atık PET elde etmek için 489,9 gr Tricholoroacetic acid ve 399 mL Dicholoromethane kimyasalları 31°C'de ısıtılıp

ISBN NR: 978-625-5694-65-2

PET şişeyi çözebilen bir çözücü sıvı hazırlanmıştır. Çözücü sıvının üretim sürecine ait aşamalar Görsel 4'de gösterilmiştir.



Görsel 4. (a) Tricholoroacetic acid tartılması. (b) Tricholoroacetic acid üzerine Dicholoromethane eklenmesi. (c) İki kimyasalın 31°C'de karıştırılarak çözücü sıvının elde edilmesi

Çözücü sıvının hazırlanmasının ardından bu çözücü sıvı içerisine parçalara ayrılmış 135 gr atık PET şişe ilave edilip PET şişe parçacıklarının çözücü sıvı içinde tamamen çözülmesi gerçekleşmiştir. Böylece sıvılaştırılmış PET şişe atık elde edilmiştir.

2.5. Kıvam (Atterberg) Deneyleri

Kıvam (Atterberg) limit deneyleri TS 1900-1 standardına uygun olarak yapılmıştır. Zeminin likit limiti düşen koni penetrasyon yöntemi ile belirlenmiştir. Deney için 40 nolu (425 µm) elekten elenen kil zeminden bir miktar porselen pota içerisine koyulmuş ve damıtık su ilave edilerek homojen bir hamur durumuna gelene kadar, palet bıçağıyla iyice karıştırılmıştır. Hazırlanan numune metal deney kabına sıkıca yerleştirildikten sonra yüzeyi çelik cetvelle düzeltilmiş ve penetrometre tabanına konulmuştur. Konik uç zeminin yüzeyini belirsizce çizecek seviyeye indirilip komparatör saati sıfır okuması yapıldıktan sonra 5 ± 1 saniye süre ile konik ucun numuneye batması beklenmiştir. Süre sonunda son komparatör saati okuması yapılmış ve iki okuma arasındaki fark koni penetrasyon değeri olarak kaydedilmiştir. Kaptaki zemin numunesinden koni deliği civarından bir miktar alınıp su muhtevası belirlenmiştir. Bu işlemler, farklı su içerikleri için 6-7 kez tekrar edilmiş ve batma miktarı-su muhtevası ilişkisi çizilerek 20 mm batmaya karşılık gelen su muhtevası zeminin likit limitini (LL) olarak belirlenmiştir.

ISBN NR: 978-625-5694-65-2

Plastik limit tayini için 40 nolu (425 µm) elekten elenen kil zeminden bir miktar alınıp homojen bir duruma gelene ve küçük bir top biçimini alabilecek kadar plâstik olana kadar, cam plâka üzerinde, damıtık su ile iyice karıştırılmıştır. Küre halindeki numune, 3 mm çapında silindirik bir çubuk şeklini alana kadar cam plâka ile el ayası arasında yuvarlanıp kılcal çatlaklar oluştuğu anda numunenin su muhtevası plastik limit (PL) olarak belirlenmiştir. Bu işlem 3-4 kez tekrar edilmiş ve ortalaması alınmıştır. Likit limit ile plastik limitin farkı plastisite indisi (PI) olarak kaydedilir. Elde edilen bu değerler ile zeminin sınıfı plastisite kartı yardımıyla bulunmuştur. Kıvam limitleri deneyi her bir oran için ayrı ayrı yapılmış ve değerlendirilmiştir.

2.6. Donma-Çözülme Deneyi

Çalışma kapsamında hazırlanan numuneler donma çözülme deneyi yapılmıştır. Harvard minyatür kompaksiyon deney aleti ile optimum su muhtevasında üretilen 33 mm çapında ve 71 mm yüksekliğindeki silindirik numuneler donma-çözülme deneyine tabi tutulmuştur (Akbulut ve Zaimoğlu, 2019). Donma çözülme deneyi; boyutları 110 cm x 55 cm x 55 cm olan, minimum -25°C maksimum +60°C olarak programlanabilen, tam otomatik donma çözülme kabininde gerçekleştirilmiştir (Akbulut ve Zaimoğlu, 2019). Numuneler 6 saati -20°C'de donma, 6 saati +23°C'de çözülme olmak üzere bir çevrimi 12 saat süren 0, 1, 3, 5, 10 ve 15 çevrimlere tabii tutulmuştur. Tüm numuneler hazırlandıktan sonra streç film ile sarılıp numunelerin su kaybı minimuma indirilmiş ve hiçbir numune çevrimini tamamlamadan donma çözülme kabininden çıkarılmamıştır. Donma çözülme her bir deney için 3 adet numune üzerinde yapılmış ve değerlendirmelerde ortalamaları kullanılmıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

3.1. Kıvam Limitleri

Kıvam limitleri deneyleri sonucunda katkısız ve %5, %10, %15 ve %20 sıvılaştırılmış PET şişe atığı katkılı kil numunelerin likit limit değerleri ile plastik limit deneyleri sonucunda belirlenen plastik limit değerleri Çizelge 3'te toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 3. Kıvam Limitleri Deney Sonuçları

Katkı oranları	LL (%)	PL (%)	PI (%)	Zemin sınıfı
0%	77	31	46	CH
5%	68	25	43	CH
10%	69	31	38	CH
15%	69	32	37	CH
20%	68	33	35	MH

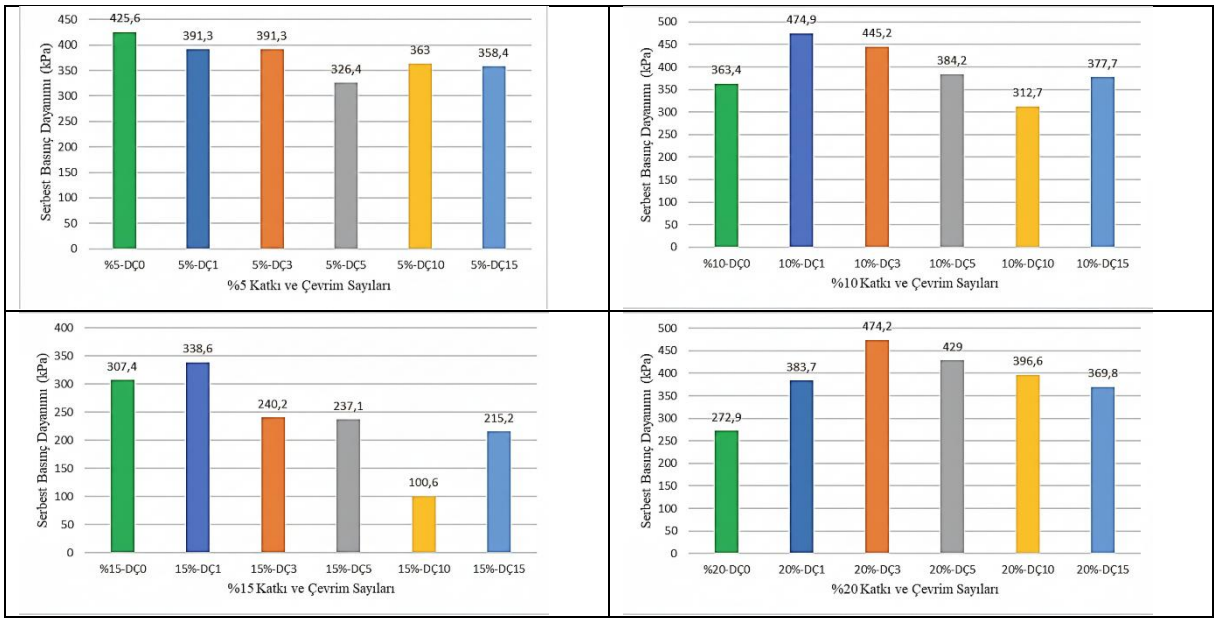
Çizelge 3 değerlendirildiğinde kıvam limitlerinde genel olarak bir azalma görülmekte olup sadece %20 sıvılaştırılmış PET şişe atığı ilavesinde zemin sınıfının MH olarak değiştiği anlaşılmaktadır.

3.2. Donma-Çözülme Deneyi

Donma-çözülme deneyi sonucunda sıvılaştırılmış PET şişe atığının %5, %10, %15 ve %20 oranları için 1, 3, 5, 10 ve 15 donma-çözülme çevrimleri sonunda numuneler serbest basınç deneyi sonuçları Görsel 5' de verilmiştir.

ISBN NR: 978-625-5694-65-2

Görsel 5. Donma-çözülme çevrim sonrası serbest basınç dayanımı değerleri



Yapılan deneyler sonucunda, katkısız zemin numunesinin serbest basınç dayanımı 298,70 kPa olarak belirlenmiştir. Görsel 5 incelendiğinde, donma-çözülme çevrim sayısının artmasıyla birlikte serbest basınç dayanımında genel olarak artış eğilimi gözlenmiştir. Ayrıca, hemen hemen tüm çevrim sayılarında sıvılaştırılmış PET şişe atığı katkılı numunelerin serbest basınç dayanımı değerlerinin, katkısız zemin numunesine ait dayanım değerinin üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgu, sıvılaştırılmış PET şişe atığının kil zeminlerin donma-çözülme çevrimleri altındaki mekanik davranışı üzerinde olumlu bir etki oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, PET katkısının kil zeminlerde dayanımı artırdığını rapor eden literatürdeki çalışmalarla da uyumludur. Nitekim Urian vd. (2023) ve Shen ve Hasan (2025), farklı PET formlarının kullanıldığı çalışmalarında, kil zeminlerin dayanım özelliklerinde belirgin iyileşmeler sağlandığını belirtmiş ve bu çalışmada elde edilen bulguları desteklemiştir.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Çalışma kapsamında, sıvılaştırılmış PET şişe atıkları ile iyileştirilen kil zeminlerin kıvam limitleri ve donma-çözülme çevrimleri altındaki davranışına ilişkin elde edilen deneysel

ISBN NR: 978-625-5694-65-2

bulgular tartışılmıştır. Deney sonuçlarının zemin davranışı üzerindeki etkileri değerlendirilmiş olup aşağıda sunulmuştur.

- Doğal kilin likit limiti %77, plastik limiti ise %31 olarak bulunmuştur. Bu değerlerden doğal kilin CH sınıfı zemin olduğu bulunmuştur.
- Katkılı kıvam deneylerinde sonucunda likit limitin tüm katkı oranları için düştüğü, plastik limitin ise sadece %5 katkı oranında düştüğü diğer oranlar için ise doğal zemininkiyle hemen hemen aynı olduğu gözlenmiştir.
- Katkısız numunenin serbest basınç deneyi sonucunda doğal zeminin maksimum serbest basınç dayanımı 298,70 kPa olarak bulunmuştur. Katkılı zeminlerin serbest basınç deney sonunda elde edilen maksimum serbest basınç dayanımı değerleri genel olarak artmıştır.
- Deneylerden elde edilen sonuç tablolarına göre katkı malzemesi zeminin maksimum gerilmesine katkısı olumlu yönde olmuştur.

5. KAYNAKÇA

Akbulut, R. K., Zaimoğlu, A. Ş. Effect of Aspect Ratio on the Freezing–Thawing of a CH Clay, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(1), 66–74, 2019.

Alpyürür, M., Şenol, A. Yüzeysel Zemin İyileştirmesinde Yeni Bir Malzeme Olarak Atık Gazbeton Kullanımı, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(2), 168–178, 2018.

Chandra, A., Siddiqua, S. Sustainable Utilization of Chemically Depolymerized Polyethylene Terephthalate (PET) Waste to Enhance Sand-Bentonite Clay Liners, *Waste Management*, 166, 346–359, 2023.

Çınar, M. E., *Atık PET ve Mermer Tozunun Kompozit Malzeme Üretiminde Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ, 2016.

Haider, A. B., Iravanian, A., Selman, M. H., Ekinci, A. Using Waste PET Shreds for Soil Stabilization: Efficiency and Durability Assessment, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 9(48), 1–13, 2023.

Hassani, A., Ganjidoust, H., Maghanaki, A. A. Use of Plastic Waste (Poly-Ethylene Terephthalate) in Asphalt Concrete Mixture as Aggregate Replacement, *Waste Management & Research*, 23(4), 322–327, 2005.

Khalid, B., Alshawmar, F. Comprehensive Review of Geotechnical Engineering Properties of Recycled Polyethylene Terephthalate Fibers and Strips for Soil Stabilization, *Polymers*, 16(13), 1764, 2024.

Lim, A., Atmaja, P. C., Rustiani, S. Bio-mediated Soil Improvement of Loose Sand with Fungus, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12, 180–187, 2020.

Movilla-Quesada, D., Raposeiras, A. C., Olavarría, J. Effects of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) on Stiffness of Hot Asphalt Mixtures, *Advances in Civil Engineering*, Article ID, 6 pages, 2019.

Peddaiah, S., Burman, A., Sreedeep, S. Experimental Study on Effect of Waste Plastic Bottle Strips in Soil Improvement, *Geotechnical and Geological Engineering*, 36, 2018.

Rai, A. K., Singh, G., Tiwari, A. K. Comparative Study of Soil Stabilization with Glass Powder, Plastic and E-waste: A Review, *Materials Today: Proceedings*, 32(4), 771–776, 2020.

Saygılı, A. Kaolen Türü Killi Zeminlerin Dayanım Özelliklerinin Melamin Formaldehit Sıvı Polimeri Kullanarak İyileştirilmesi, *Artvin Çoruh Üniversitesi Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 4(2), 133–139, 2018.

Sevencan, F., Vaizoğlu, S. A. PET ve Geri Dönüşümü, *TSK Koruyucu Hekimlik Bülteni*, 6(4), 307–312, 2007.

Sheikh, F., Alshameri, B., Maqsood, Z., Haider, A., Hassan, J. PET Waste Management in Pakistan through Use of PET Shreds as Additive in Backfill Soil, *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(10), 1239, 2023.

Shen, N. J., Hasan, M. Transforming Waste into Stability: Improving the Soft Clay Soil with Polyethylene Terephthalate (PET) Column as a Sustainable Solution, *Journal of Engineering and Applied Science*, 72(1), 52, 2025.

Tayyar, A. E., Üstün, S. Geri Kazanılmış PET'in Kullanımı, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 16(1), 2010.

Urian, A. M., Ilies, N. M., Nemes, O., Nagy, A. C. Clayey Soil Improvement with Polyethylene Terephthalate (PET) Waste, *Applied Sciences*, 13(21), 12081, 2023.

Vural, İ. İnşaat Yıkıntı Atıklarının Zemin İyileştirmesinde Kullanılabilirliği, *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7(1), 1–6, 2018.

Zukri, A., Nazir, R., Mender, F. N. An Experimental Study on Stabilization of Pekan Clay Using Polyethylene and Polypropylene, *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 030002, 1–6, 2017.