



PPF Lifi ve PET Talaşı ile Güçlendirilmiş Kaolin Kilinin Kayma Mukavemetinin İncelenmesi

Investigation of the Shear Strength of Kaolin Clay Reinforced with PPF Fibers and PET Flakes

Hüseyin Suha Aksoy* , Atakan Yıldırım 

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

Öz

Zeminin kayma mukavemeti, inşa edilecek bir yapının temelini tasarımımda önemli bir rol oynar. İnşaat mühendisleri mevcut zeminlerin, yapı yükünü taşıyabilecek durumda olmasını beklerler. Ancak zaman zaman yapı yükünü taşıyamayan zayıf zeminler ile karşılaşmaktadır. Bu nedenle bu tür zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında, düşük plastisiteli bir kil olan kaolin kilinin mukavemeti, Polipropilen Elyaf (PPF) lifleri ve Polietilen Tereftalat (PET) talaşları kullanılarak laboratuvar ortamında artırılmaya çalışılmıştır. PPF lifleri düşük maliyeti ve dayanıklılığından dolayı, PET talaşları ise hem ekonomik olması hem de gün geçtikçe artan katı atık hacminin azaltılması amacıyla tercih edilmiştir. Bu amaçla kaolin kiline ağırlıkça %0, %0.5, %1.0, %1.5 ve %2.0 oranlarında PPF lifleri ve PET talaşları ilave edilerek karışımlar oluşturulmuş ve Proctor deneyleri yardımıyla optimum su muhtevaları (wopt) ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları (γ_{kmax}) belirlenmiştir. Proctor sıklığında hazırlanmış numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda katkılı kaolin kilinin mukavemetinde dikkate değer artışlar olduğu tespit edilmiştir. Optimum su muhtevasında ve Proctor sıklığında hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre %2.0 PPF eklenen kaolin kilinin serbest basınç mukavemeti, katkısız kaolin kili numunelere göre %116 oranında artış göstermiştir. Aynı oranda PET katkısı ile iyileştirilen kaolin kilinde ise serbest basınç mukavemeti %36 artış göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Kil zemin, polietilen tereftalat, polipropilen elyaf, zemin iyileştirme

Abstract

The shear resistance of the soil plays an important role in the design of the foundation of a structure to be built. In civil engineering, existing soils are expected to be capable of bearing structural loads. However, sometimes weak soils that cannot carry the load of the building can be encountered. Therefore, it is necessary to improve the engineering properties of such soils.

In this study, the strength of kaolin, a clay with low plasticity, was investigated in the laboratory using Polypropylene (PPF) fibers and Polyethylene Terephthalate (PET) flakes. While PPF fibers were preferred due to their low cost and durability, PET flakes were preferred because they are both economical and reduce the volume of solid waste that is increasing day by day. For this purpose, by adding 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0% PPF fibers and PET flakes by weight to kaolin clay, optimum water content (wopt) and max. dry unit volume weights (γ_{kmax}) were determined. Uniaxial compression tests were carried out on the samples prepared in Proctor density. As a result of the experiments, it was determined that there was a significant increase in the strength of the reinforced kaolin clay. According to the test results performed on the samples prepared with optimum water content and Proctor density, the unconfined compressive strength of kaolin clay with 2.0% PPF increased by 116% compared to the pure kaolin clay samples. On the other hand, unconfined compressive strength increased by 36% in kaolin clay improved with PET additive at the same rate.

Keywords: Clay soil, polyethylene terephthalat flakes, polypropylene fibers, soil improvement

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: saksoy@firat.edu.tr

Hüseyin Suha Aksoy  orcid.org/0000-0003-0564-457X

Atakan Yıldırım  orcid.org/0009-0008-6713-0877



1. Giriş

Gevşek veya yumuşak zemin üzerinde yapı inşaatı oldukça risklidir çünkü bu tür zeminlerin, zayıf taşıma gücü ve yüksek sıkışmasından dolayı aşırı ve farklı oturmalar görülmesi mümkün olacaktır. Zemin iyileştirmesinin amacı zeminin mühendislik özelliklerinin herhangi bir yapı için yeterli olmadığı durumlarda, zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi ve zeminin yapılacak inşaat için elverişli hale getirilmesidir (Bilgen 2020a, Afşar ve Bilgen 2021). Zemin iyileştirilmesinde kullanılacak olan malzemelerin maliyeti ucuz olmalı, çevreye zarar vermemeli ve zorlu çevre koşullarına dayanıklı olmalıdır. Bu tür avantajları nedeniyle polipropilen lif (PPF) kullanımı zemin iyileştirmesi için oldukça uygundur (Aksoy vd. 2021). Dayanıklılığında, düşük maliyetinden ve kolay bulunabilirliğinden dolayı PPF uygulaması çoğu geoteknik mühendisliği problemleri için etkili bir çözüm olabilir (Prabakar ve Sridhar 2002, Maliakal ve Thiyyakkandi 2013). İnsanlığın sürdürülebilir gelişimi için yeni tekniklerin ve konseptlerin kavramsallaştırılması ve yürütülmesi, yaygın ve büyük bir şekilde atılan belirli atıkların büyük miktarının dönüştürülmesini ve yeniden kullanılmasını mümkün kılmak gereklidir (Bilgen ve Altunbaş 2023). Literatürde zeminin güçlendirilmesi için geri dönüştürülmüş polietilen tereftalat (PET) talaşlar kullanımını öneren araştırmalar mevcuttur (Botero vd. 2015). PET talaşlar, polyester ailesinden gelen bir termoplastik polimerdir. Mekanik ve termal özellikleri arasındaki ilişki ve ucuz maliyetinden dolayı PET 1990'lı yılların sonunda dünya üretiminde $2.4 * 10^{10}$ kg üretime ulaşarak, dünya genelinde en çok üretilen termoplastik türü olmuştur (Romão vd. 2009). Amerikan Birleşik Devletleri'nde 2013 yılında yerli kaynaklardan geri dönüştürülmek için yaklaşık 0.81 milyon kg PET şişe toplanmıştır (NAPCOR 2016). 2013 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde şişe üretiminde kullanılan toplam PET miktarı 2.61 milyon kg'dan yüksektir (Louzada vd. 2019). Zemine ilave edilen liflerin rolünü tanımlamaya yönelik ilk yaklaşımlar, önceden belirlenen bir zemin ile birlikte kullanılacak olan lifin zeminin taşıma gücüne katkısına odaklanmıştır (Wu 1976 ve Waldron 1977). Çeşitli çalışmalarda tek eksenli deneyler, direkt kesme deneyi ve üç eksenli deney kullanılmakta ve sonuçların çoğu takviye edilen liflerin etkinliğini göstermektedir (Al-Refeai 1991, Ranjan vd. 1996, Trindade vd. 2006, Dos Santos vd. 2010, Festugato vd. 2017, Peddaiah vd. 2018, Fathi vd. 2020, Onyelowo vd. 2019). Literatür incelendiğinde, zeminlere ilave edilen PPF lif ve PET talaş gibi polimer ilavelerin zeminin mukavemetinin artmasında etkili olduğu görülmüştür. İlave edilecek malzemelerin oranı killi zeminlerde %1.5 civarında

olmasının uygun olacağı sonucuna varmıştır (Castilho vd. 2021). Zemin iyileştirilmesi yapılırken dikkat edilmesi gereken konulardan biri de çevre kirliliğidir. Çünkü zeminin güçlendirilmesi üzerine çok sayıda etkili materyal vardır ve bu materyallerin bir kısmı çevre üzerinde kirliliğe neden olabilir. PPF çevreye zarar vermemektedir. Bütün bunlara ek olarak PPF bütün lif tipleri arasında en hafifidir. Polyester ve naylondan sırasıyla %34 ve %20 daha hafiftir. Dolgu inşaatlarında Polipropilen seçilmesinin bir diğer nedeni ise sıcaklık değişimlerinin etkisidir. Polipropilen -55 derece civarına kadar esnek kalmaktadır. PPF düşük su emilimine sahiptir. PPF ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş zeminlerin sünekliliği kıyaslandığında, güçlendirilmiş zeminin sünekliliğinde artış olduğu gözlemlenmiştir (Aksoy vd. 2021). PPF'in geoteknik mühendisliğindeki en popüler uygulamaları set, dolgu, temel, alt temel ve şev stabilitesi problemleridir (Li ve Ding 2002, Tang vd. 2007, Unnikrishnan vd. 2002). Maher (1988), Maher ve Gray (1990) rastgele dağıtılan fiberlerle güçlendirilmiş zeminin gerilme – şekil değiştirme davranışını belirlemek için üç eksenli deneyler yürütmüştür. Bu durumda, zeminin nihai mukavemetinde önemli bir artış gözlemlenmiştir. Wang (1999) zemin iyileştirmesinde, zeminde ve betonda takviye lifi olarak halı atığı kullanmıştır. Yazar naylon ve PPF halı atığı türlerini betona takviye olarak kullanılmasını önermiştir. Yaptığı çalışmalar sonucunda güçlendirilmiş zeminlerin mukavemetlerinin ve sünekliliğinin arttığını belirlemiştir. Bazı araştırmacılar, sentetik lifler ile güçlendirilmiş kohezyonlu iki zemin tipiyle (kil ve siltli kil) çalışmıştır (Calvo 2006, Calvo vd. 2007). Laboratuvar deneylerinde, sentetik liflerin eklenmesinden sonra zeminin mekanik özelliklerinde önemli artışlar meydana geldiğini tespit etmiştir. Kilin mukavemetindeki artışın, siltli kildekinden daha fazla olduğunu belirlemiştir. Ayrıca lif boyu arttıkça zemin mukavemetinde artış olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada, laboratuvar ortamında killi bir zemine ağırlıkça farklı oranlarda PPF lifleri ve PET talaşları eklenerek kilin mukavemet parametrelerinin değişimi incelenmiştir. Daha önce yapılmış çalışmaların çoğunda PET şişeler şeritler halinde kesilmiş ve zemine katılarak kullanılmıştır. Ancak PET şişeler, sanayide şeritler haline getirilmeden parçalayıcıda kırılarak talaş haline getirilmektedir. Dolayısı ile PET malzemesinin büyük miktarda temin edilmesi ancak talaş formunda mümkündür. Bu nedenle yapılan çalışmada PET talaşının kullanılması uygun görülmüştür. Bu amaçla ilk olarak katkısız kaolin, Proctor sıklığında hazırlanarak serbest basınç mukavemeti belirlenmiştir. Ardından kil zemine PPF liflerin ve PET talaşları ağırlıkça farklı oranlarda eklenerek

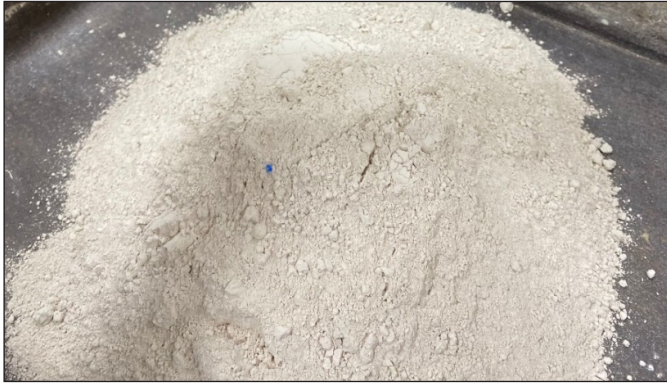
(%0.5, %1.0, %1.5, %2.0) Proctor sıklığında zemin numuneleri hazırlanmış ve serbest basınç deneyi yapılmıştır. Yapılan serbest basınç deneylerinin kıyaslanması sonucunda, Proctor sıklığında hazırlanan kil zemine ağırlıkça eklenen PPF elyaflarının PET talaşlara göre zeminin mukavemetinin iyileştirilmesinde daha etkili olduğu belirlenmiştir.

2. Gereç ve Yöntemler

2.1. Kullanılan Malzemeler

2.1.1. Kaolin Kili ve Özellikleri

Kaolin (Şekil 1) volkanik kayaların veya granitin kimyasal ayrışması sonucunda meydana gelmektedir. İçerisinde bulunan minerallere göre rengi farklılık göstermektedir. Ancak kaolin genellikle doğada beyaz renkte bulunan bir kil türüdür (Özpolat 2020).



Şekil 1: Kaolin kili.

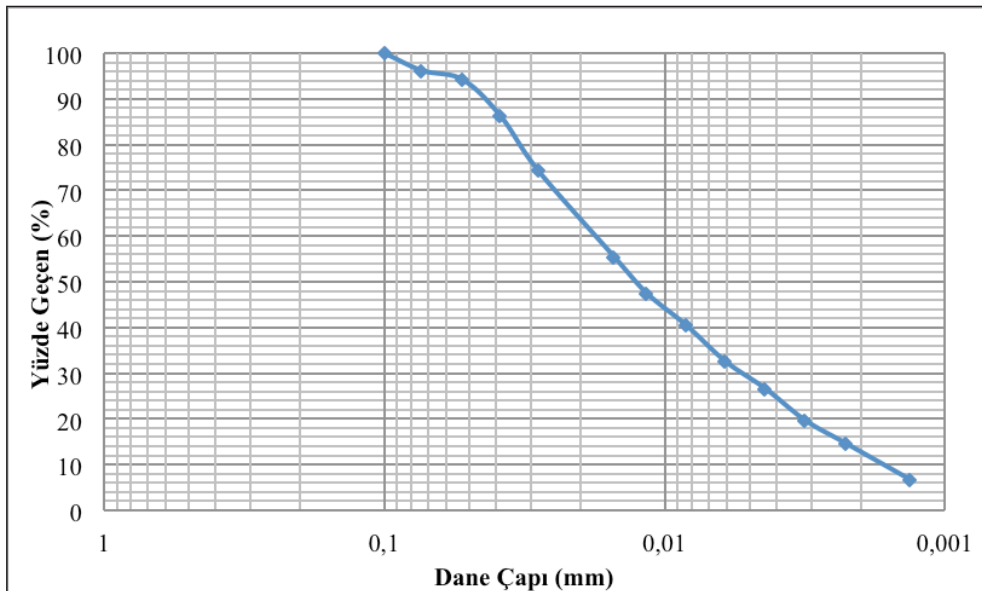
Bir yapının temelleri altında killi zeminlerin varlığı birçok problemi beraberinde getirmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda, iyileştirilecek ve zemin deneyleri gerçekleştirilecek olan kaolin kili Balıkesir bölgesinden temin edilmiş olup bu kilin özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Kil zeminin dane boyutunun belirlenmesi için hidrometre analizi yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen granülometri eğrisi Şekil 2'de görülmektedir. Kullanılan kaolin kilinin yaklaşık %96'sının 200 nolu elekten geçtiği tespit edilmiştir.

Kaolin kilinin kıvam limitlerini belirlemek için likit limit ve plastik likit deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda elde edilen veriler Çizelge 2'de görülmektedir.

Çizelge 1: Kaolin kilinin genel özellikleri (Özpolat 2020).

Özellikler	Değerler
Beyazlık (%)	89.38
Dane boyutu (μm cinsinden)	$D_{50} : 1.3$ < 10 $\mu\text{m} : 97.1$ < 2 $\mu\text{m} : 60.8$
Kimyasal İçeriği (%)	$\text{SiO}_2 = 58.40$ $\text{Al}_2\text{O}_3 = 38.74$ $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1.86$ $\text{TiO}_2 = 0.63$
Nem Oranı (%)	0.37
pH	6.83
Özgül Ağırlık (G_s)	2.63



Şekil 2. Kil granülometri eğrisi.

Çizelge 2. Kil malzemenin LL, PL ve IP değerleri.

Kıvam Analizleri	(%)
Likit Limit (LL)	28
Plastik Limit (PL)	16
Plastisite İndisi (IP)	12

Yapılan deneyler sonrasında kaolin kilinin optimum su muhtevasını ve maksimum kuru birim hacim ağırlığını belirlemek için standart Proctor deneyi yapılmıştır. Herhangi bir katkı maddesiyle karıştırılmadan saf haldeki kaolin kili saf su ile yoğurulup standart Proctor deneyine tabii tutulmuştur. Yapılan standart Proctor deneyi sonucu elde edilen veriler Çizelge 3'de görülmektedir.

Çizelge 3: Kaolin kilinin kompaksiyon parametreleri.

Optimum Su İçeriği, w_{opt} (%)	18.30
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_{k,mak}$ (g/cm^3)	1.66

2.1.2. Polipropilen Elyaf (PPF) ve Özellikleri

PPF (Şekil 3) propilen polimerizasyonundan elde edilen doğrusal sentetik elyaf polimer türüdür. Düşük yoğunluklu olma, yüksek mukavemeti olma ve korozyona dayanıklı olma gibi avantajlara sahiptir (Liu vd. 2021). Çizelge 4'de PPF'in fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4. PPF'in fiziksel özellikleri (Li vd. 2014).

Özgül Ağırlık (G_s)	0.91
Elyaf Uzunluğu, L_f (mm)	18.00
Elyaf Kalınlığı veya Çapı, D_f (mm)	0.03
Boy / En Oranı (L_f / D_f)	600
Yoğunluk (kN / m^3)	8.927
Çekme Mukavemeti (MPa)	350
Elastisite Modülü (MPa)	3500

2.1.3. Polietilen Tereftalat (PET) ve Özellikleri

PET talaşlar (Şekil 4), tüketim sonrası içecek şişeleri olan PET'ten üretilen termoplastik polimer türüdür (Ekopet Geri Dönüşüm San. Tic. A.Ş.). Bu çalışma kapsamında kullanılmış olan PET talaşlar istenilen boyutlarda hazır temin edilmiştir. Türkiye'nin hemen her bölgesinde toplamda 15

**Şekil 3.** Polipropilen elyaf.

– 20 adet PET talaş üretim tesisi bulunmaktadır. Bu tesisler, pet şişeleri toplayıp, etiketlerinden, kapaklarından ayırıp temizledikten sonra parçalayarak 1 mm boyutuna kadar küçük parçalara ayırmakta ve ticari mal olarak değerlendirmektedirler.

**Şekil 4.** PET talaş.

PET talaşların Ekopet Geri Dönüşüm Laboratuvarı'nda yapılan deneyler sonucunda elde edilen fiziksel özellikleri Çizelge 5'de verilmiştir.

2.2. Yöntem

Belirlenen oranlarda katkı maddeleriyle karıştırılan killi

Çizelge 5. PET talaş fiziksel özellikleri (Ekopet Geri Dönüşüm San. Tic. A.Ş.).

Özellikler	Birim	Min	Maks	Test Metot
İşsel Viskozite, IV	dl/g	0.70	0.75	ASTM D 4603
Hacimsel Yoğunluk	kg/m ³	285	350	ISO 12418-2:2012
pH	-	6	7.5	PH Metre
Su İçeriği	%	0.30	0.70	ISO 12418-2:2012
Pul Boyutu	mm	8	12	ISO 12418-2:2012
PVC Atığı	ppm	10	50	ISO 12418-2:2012
Poliolefin atığı	ppm	10	50	ISO 12418-2:2012
Diğer Atıklar	ppm	10	50	ISO 12418-2:2012
Renk	-	%20 Mavi	%80 Açık	-
Paketleme Ağırlığı	kg		1100	-

zeminler, optimum su muhtevalarını ve maks. birim hacim ağırlıklarını belirlemek için standart Proctor deneyi yapılmıştır. Bu bölümde Proctor sıklığında hazırlanan kaolin kiline PPF ve PET talaşların ağırlıkça farklı oranları (%0.5, %1.0, %1.5, %2.0) eklenerek yapılan minyatür Proctor deneyinden bahsedilecektir. Minyatür Proctor aletiyle hazırlanan kil numuneleri serbest basınç deneyine tabii tutulmuştur.

2.2.1. Standart Proctor Deneyi

Zeminlerin sabit, hareketli ve dinamik yükler altında meydana gelecek oturmaları ve zeminin geçirimsizliğini azaltarak su almasını önlemek ve taşıma gücünü arttırmak amacıyla, tabakalar halinde serilerek mekanik araçlar vasıtasıyla su ve dane hacmi sabit iken havanın dışarı atılarak sıkıştırılması olayına kompaksiyon denilmektedir (TS 1900-1,2006).

Proctor metodu, numuneleri belli bir enerji ile sıkıştırarak her aşamada su muhtevasını arttırmak suretiyle tekrarlayarak zemin numunesinin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığını belirlemeye yarayan deney yöntemidir (Akan ve Keskin 2018, Bilgen 2020b).

Proctor deneyleri, ASTM D-698 standartlarına göre yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında elde edilen kompaksiyon eğrisi Şekil 7'de ve katkısız kaolin kilinin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı Çizelge 3'te verilmiştir.

Kaolin kiline ağırlıkça farklı oranlarda PPF lifler ve PET talaşlar eklenerek (%0.5, %1.0, %1.5, %2.0) elde edilen karışımlar standart Proctor deneyine tabii tutulmuştur. Standart Proctor deney sonuçları Çizelge 6 ve Çizelge 7'de verilmiştir.

Çizelge 6. Kaolin kili - PPF karışımlarının standart Proctor deneyi sonuçları.

Ağırlıkça Oranlar, %	Optimum Su İçeriği, w_{opt} , %	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık, γ_{kmak} , gr/cm ³
0.5	16.70	1.65
1.0	17.30	1.63
1.5	17.60	1.62
2.0	18.20	1.61

Çizelge 7. Kaolin kili - PET talaşı karışımlarının standart Proctor deneyi sonuçları.

Ağırlıkça Oranlar, %	Optimum Su İçeriği, w_{opt} , %	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık, γ_{kmak} , gr/cm ³
0.5	17.60	1.65
1.0	17.00	1.64
1.5	18.00	1.63
2.0	18.20	1.62

Serbest basınç deneylerini yapabilmek için standart Proctor deneti ile belirlenen su muhtevalarında karışımlar hazırlanmış ve Minyatür Proctor aleti (Şekil 5) kullanılarak sıkıştırılmıştır. Bu işlemin sonucunda 3.77 cm çapında, 7.69 cm yüksekliğinde silindirik zemin numuneleri (Şekil 6) elde edilmiştir.

2.2.2. Serbest Basınç Deneyi

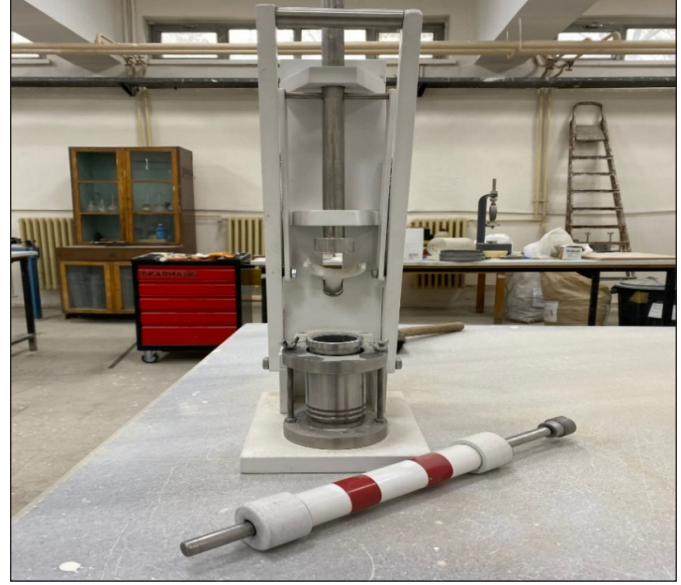
Serbest Basınç Deneyi, genellikle suya doygun normal konsolide killi zeminlerde kayma mukavemetinin belirlenmesi için kullanılan bir deneydir (Satı 2016). Kaolin kili, PPF lifleri ve PET talaşları kullanılarak elde edilmiş numuneler ASTM D2166-06 Standardına uygun şekilde serbest basınç deney aleti ile 0.5 mm/ dk yükleme hızıyla kesilmiştir. Eksenel yük ile yüklenen numune, bir noktadan sonra yük alamaz hale gelmiş ve uygulanan eksenel yük değeri düşmeye başlayınca deney sonlandırılmıştır. Bu esnada okunan en yüksek eksenel yük değeri numunenin o andaki kesit alanına bölünerek gerilmeye dönüştürülmüştür. Bu sayede elde edilen birim boy kısalmasına denk gelen eksenel gerilme eğrileri çizilmiştir. Eksenel gerilmenin maksimum olduğu değer numunenin serbest basınç mukavemet değeri olarak belirlenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Laboratuvar ortamında yapılan çalışmalar sonucunda kaolin kiline PPF ve PET talaşların ağırlıkça farklı oranları eklenmiş olup numunelere serbest basınç deneyi yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda katkısız kaolin kili ve katkılı kaolin kilinin mukavemetleri kıyaslanmıştır. Katkısız kaolin kiline PPF ve PET talaşların ağırlıkça farklı oranları eklenerek yapılan Standart Proctor deneyi sonucunda elde edilen kompaksiyon eğrileri Şekil 7'de verilmiştir. Elde edilen veriler sonucunda, her iki katkı içinde katkısız kaolinin optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Kaolin kiline PPF ve PET talaşların ağırlıkça farklı oranları eklenerek yapılan serbest basınç deneyi sonucunda elde edilen gerilme – şekil değiştirme eğrisi Şekil 8'de gösterilmiştir.

Çizelge 3'de görüldüğü üzere katkısız kaolin kiline yapılan standart Proctor deneyi sonucunda optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla %18.30 ve 1.66 gr/cm^3 olarak belirlenmiştir. Sonra PPF ve PET talaşların ağırlıkça farklı oranları eklenerek yapılan deneyler sonucunda, ağırlıkça %0.5 eklenen PET talaşlar ile hazırlanan kaolin kiline yapılan standart Proctor deneyi sonucunda optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla %17.60 ve 1.65 gr/cm^3 , ağırlıkça %0.5 eklenen PPF katkısı ile hazırlanan kaolin kiline yapılan Standart Proctor deneyi sonucunda optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla %16.70 ve 1.65 gr/cm^3 olarak belirlenmiştir. Şekil 9'da görüldüğü üzere, ağırlıkça eklenen PPF ve PET



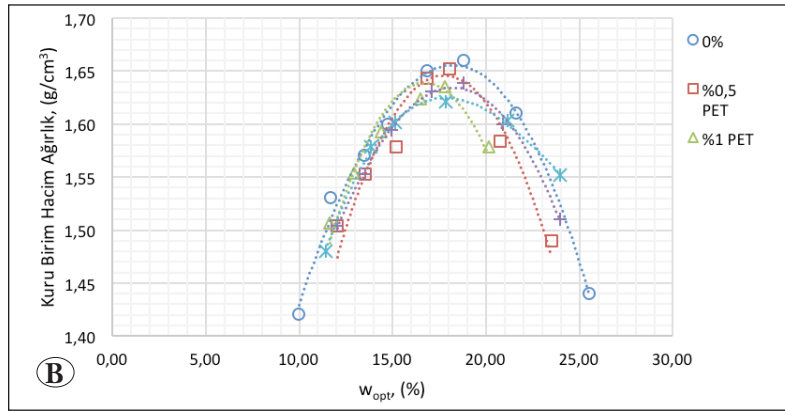
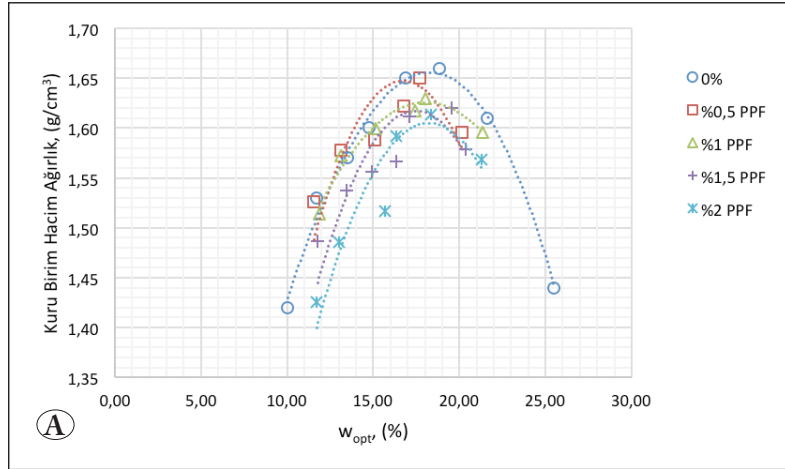
Şekil 5. Minyatür Proctor aleti.



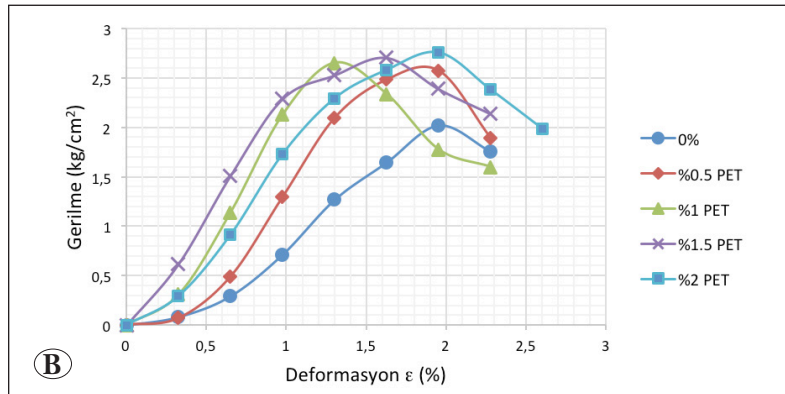
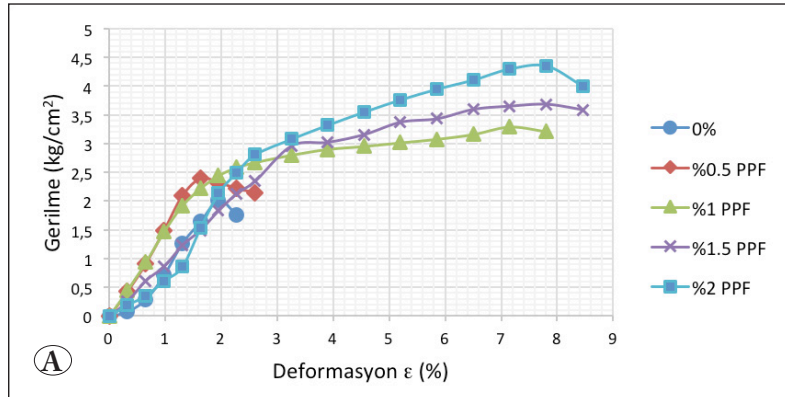
Şekil 6. Kaolin kiline uygulanan serbest basınç deneyi.

talaşların oranının artmasıyla optimum su muhtevasının arttığı gözlemlenmiş olup, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin ise düştüğü belirlenmiştir.

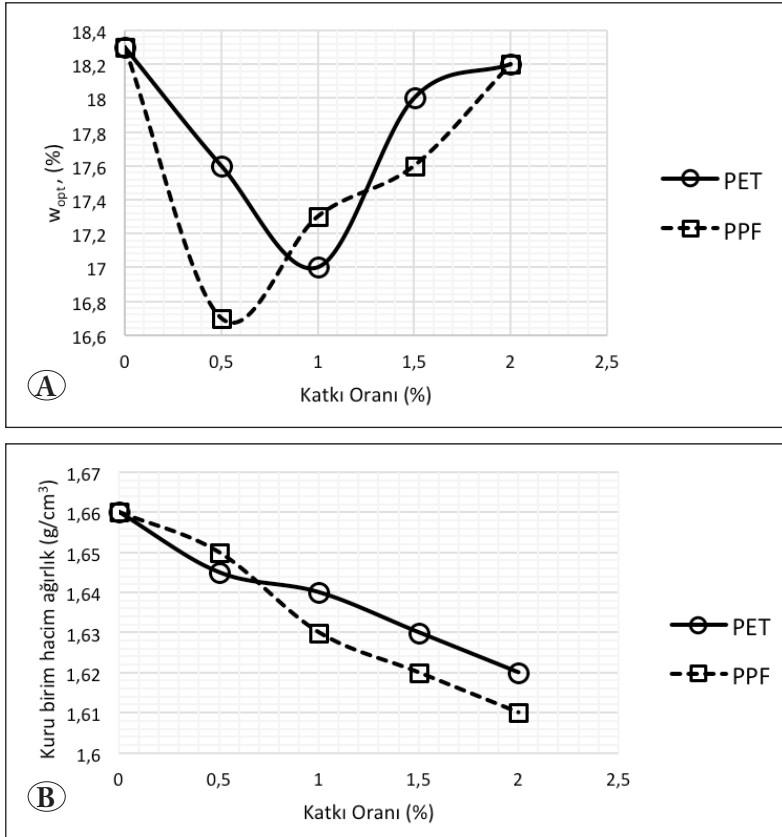
Serbest basınç deneyi sonucunda katkısız kaolin kilinin maksimum mukavemeti 2.02 kg/cm^2 olarak belirlenmiştir. PPF ve PET talaşlarının ağırlık oranının artırılmasıyla serbest basınç mukavemeti değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Proctor sıklığında hazırlanan kaolin kiline ağırlıkça %2.0 oranda PPF ve PET talaşlar eklenerek hazırlanan numuneye serbest basınç deneyi yapılmıştır. Çi-



Şekil 7. Katkısız kaolin kili ve ağırlıkça farklı oranları eklenen PPF (A) ve PET talaşların (B) kompaksiyon eğrisi.



Şekil 8: A) PPF (B) PET talaş malzemelerinin gerilme - deformasyon eğrisi.



Şekil 9. Su muhtevası – katkı oranı ilişkisi (A) kuru birim hacim ağırlığı- katkı oranı ilişkisi (B).

zelge 8 ve Çizelge 9'da görüldüğü üzere, yapılan deneyler sonucunda serbest basınç mukavemeti sırasıyla PET talaş ve PPF için 2.76 kg/cm², 4.36 kg/cm² olarak elde edilmiştir. Şekil 10'da elde edilen veriler sonucunda katkılı kaolin kilinin mukavemetinde saf haline göre PET talaş için %36, PPF için %116'lık artışlar olduğu tespit edilmiştir.

4. Sonuç ve Öneriler

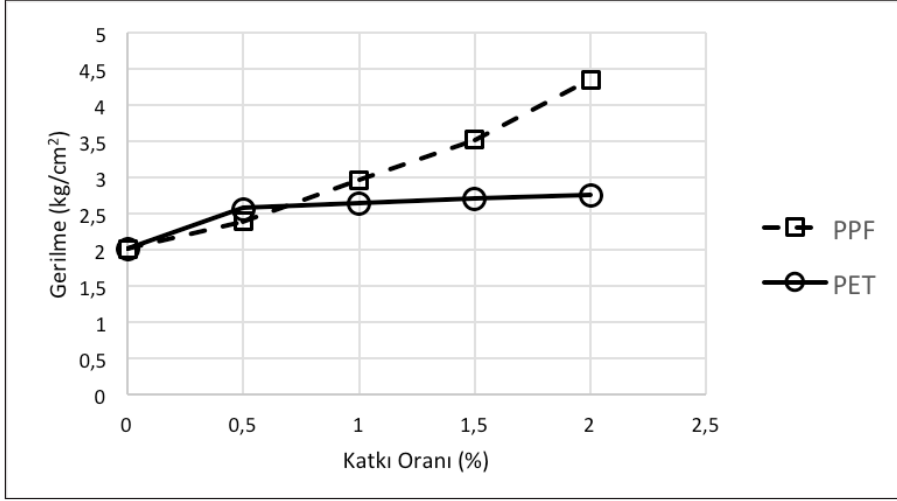
Bu çalışmada laboratuvarında kaolin kili ile PPF ve PET katkıları karıştırılmış ve Proctor sıklığında hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. PET katkısı geri dönüşüm tesislerinden temin edilmiş olup neredeyse sıfır maliyetli bir malzemedir. PPF katkısı ise üretim tesislerinden hazır olarak temin edilmiş bir malzemedir ve atık bir ürün olmadığı için daha yüksek maliyetlidir. Yapılan deneyler sonucunda, kaolin kiline eklenen PPF ve PET katkılarının kaolin kilinin serbest basınç mukavemetini artırdığı belirlenmiştir. PPF katkısının, life benzer bir yapıya sahip olması (Boy/En≥600) ve PET ile kıyaslandığında daha düşük birim hacim ağırlığına sahip olmasından dolayı PPF katkısının daha düşük oranlarda bile mukavemeti yeterli oranda artırdığı gözlemlenmiştir. PET talaşının lif benzeri bir yapıya sahip olmamasından dolayı ve Boy/En

Çizelge 8. Kaolin kiline PET talaşların ağırlıkça farklı oranları eklenerek hazırlanan numunelerin serbest basınç deneyleri sonrasında elde edilen serbest basınç mukavemetleri

PET Talaş %	Serbest Basınç Mukavemeti (kg / cm ²)
0.5	2.58
1.0	2.66
1.5	2.71
2.0	2.76

Çizelge 9. Kaolin kiline PPF liflerin ağırlıkça farklı oranları eklenerek hazırlanan numunelerin serbest basınç deneyleri sonrasında elde edilen serbest basınç mukavemetleri.

PPF %	Serbest Basınç Mukavemeti (kg / cm ²)
0.5	2.40
1.0	2.97
1.5	3.53
2.0	4.36



Şekil 10. Kaolin kiline PPF ve PET talaşların ağırlıkça farklı oranları eklenerek hazırlanan numunelerin serbest basınç deneyi sonrasında elde edilen maksimum gerilme değerleri değişimi.

oranının yaklaşık 1 civarında olması nedeniyle donatı görevi görememiş ve ağırlıkça %0.5 oranından sonra zemin-PET talaşı karışımının mukavemetinin çok fazla artmadığı gözlemlenmiştir.

Optimum su muhtevasında ve Proctor sıklığında hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre %2.0 PPF eklenen kaolin kilinin serbest basınç mukavemeti, katkısız kaolin kili numunelere göre %116 oranında artış göstermiştir. Aynı oranda PET katkısı ile iyileştirilen kaolin kilinde ise serbest basınç mukavemeti %36 artış göstermiştir.

Hem PPF hem de PET katkılarının kaolin içerisindeki ağırlıkça yüzde oranları arttıkça karışımların birim hacim ağırlıklarının azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca optimum su muhtevasının ise önce azaldığı ve daha sonrasında arttığı gözlemlenmiştir.

Her iki katkı içinde artan katkı oranlarıyla kaolin zemininin mukavemeti sürekli artış göstermiştir. Ancak yüksek maliyeti ve zemini iyileştirmesindeki başarısı da göz önüne alındığında PPF katkısının killi zeminlerde ağırlıkça %0.5 oranında kullanılmasının yeterli olacağı belirlenmiştir. PET katkısı ise atık bir malzeme olup tek maliyeti geri dönüşüm için yapılan harcamalardır. Bu nedenle PET katkısının zeminde daha yüksek oranlarda kullanılması hem mukavemeti artıracak hem de doğaya atılan katı atıkların hacminin azaltılmasını sağlayacaktır. Yukarıda sayılan nedenlerle killi zeminlerde %2.0 ve daha yüksek oranlarda PET katkısının kullanılmasının uygun olabileceği sonucuna varılmıştır.

5. Kaynaklar

- Afşar, E., Bilgen, G. (2021).** Kuyu temel maliyetinin deprem riskine göre değişimi. *Tasarım Mimarlık ve Mühendislik Dergisi*, 1(3), 181-188.
- Akan, R., Keskin, S. N. (2018).** Kompaksiyon Yönteminin Kohezyonlu Zeminlerin Serbest Basınç Mukavemetine Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(2), 250-257.
- Aksoy, H. S., Edan, O. M. E., Taher, N. (2021).** Shear Strength Parameters of Sand Reinforced with Polypropylene Fiber. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(4), 900-907.
- Al-Refeai, T. O. (1991).** Behavior of granular soils reinforced with discrete randomly oriented inclusions. *Geotextiles and Geomembranes*, 10(4), 319-333.
- ASTM, D2166-06. (2016).** Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. *West Conshohocken, PA, United States*.
- ASTM D698-00. (2000).** Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). *Annual Book of ASTM Standards*, 4.
- Bilgen, G. (2020a).** Geri Dönüştürülmüş Beton Agregasının Düşük Plastisiteli Bir Kilin Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(3), 1714-1719.
- Bilgen, G. (2020b).** Utilization of powdered glass in lime-stabilized clayey soil with sea water *Environmental Earth Sciences*, 79 (19), 472.
- Bilgen, G., Altuntas, O. F. (2023).** Sustainable re-use of waste glass, cement and lime treated dredged material as pavement material. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01815.
- Botero, E., Ossa, A., Sherwell, G., Ovando-Shelley, E. (2015).** Stress-strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET). *Geotextiles and Geomembranes*, 43(4), 363-369.

- Calvo, C. F., (2006).** Estudio experimental de refuerzo de suelos con fibras sintéticas.
- Calvo, C. F., Santamaría, J. M. M., Mayoral, J. M. T. (2007).** Refuerzo de suelos con fibras sintéticas. *Rutas: Revista de la Asociación Técnica de Carreteras*, (121), 13-24.
- Castilho, T. W., Rodrigues, R. A., Lodi, P. C. (2021).** Use of Recycled Polyethylene Terephthalate Strips in Soil Improvement. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(8), 5943-5955.
- Dos Santos, A. S., Consoli, N. C., Baudet, B. A. (2010).** The mechanics of fibre-reinforced sand. *Geotechnique*, 60(10), 791-799.
- Fathi, H., Jamshidi Chenari, R., Vafaeian, M. (2020).** Shaking table study on PET strips-sand mixtures using laminar box modelling. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(1), 683-694.
- Festugato, L., Menger, E., Benezra, F., Kipper, E. A., Consoli, N. C. (2017).** Fibre-reinforced cemented soils compressive and tensile strength assessment as a function of filament length. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(1), 77-82.
- https://www.eko-pet.com.tr/uploads/ekoflake_f-01_product_standarts.pdf
- Li, J., Ding, D., (2002).** Nonlinear elastic behavior of fiberreinforced soil under cyclic loading. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 22(9-12), 977-983.
- Li, J., Tang, C., Wang, D., Pei, X., Shi, B. (2014).** Effect of discrete fibre reinforcement on soil tensile strength. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(2), 133-137.
- Liu, Y., Wang, L., Cao, K., Sun, L. (2021).** Review on the Durability of Polypropylene Fibre-Reinforced Concrete. *Advances in Civil Engineering*, 2021.
- Louzada, N. D. S. L., Malko, J. A. C., Casagrande, M. D. T. (2019).** Behavior of clayey soil reinforced with polyethylene terephthalate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(10), 04019218.
- Maher, M. H. (1988).** Static and dynamic force response of sands reinforced with discrete, randomly distributed fibers. *University of Michigan*.
- Maher, M. H., Gray, D. H. (1990).** Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers. *Journal of geotechnical engineering*, 116(11), 1661-1677.
- Maliakal, T., Thiyakkandi, S. (2013).** Influence of randomly distributed coir fibers on shear strength of clay. *Geotechnical and Geological Engineering*, 31(2), 425-433.
- NAPCOR (2016).** (National Association for PET Container Resources). n.d. Accessed.
- Onyelowe, K. C., Bui Van, D., Ubachukwu, O., Ezugwu, C., Salahudeen, B., Nguyen Van, M., Ugorji, B. (2019).** Recycling and reuse of solid wastes; a hub for ecofriendly, ecoefficient and sustainable soil, concrete, wastewater and pavement reengineering. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 14(3), 440-451.
- Özpolat, A. (2020).** Killi zeminlerde kazıklı radye temellerin düşey yükler etkisi altında davranışının model deneyleri ile incelenmesi.
- Peddaiah, S., Burman, A., Sreedeeep, S. (2018).** Experimental study on effect of waste plastic bottle strips in soil improvement. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(5), 2907-2920.
- Prabakar, J., Sridhar, R. S. (2002).** Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil. *Construction and Building materials*, 16(2), 123-131.
- Ranjan, G., Vasan, R. M., Charan, H. D. (1996).** Probabilistic analysis of randomly distributed fiber-reinforced soil. *Journal of geotechnical engineering*, 122(6), 419-426.
- Romão, W., Spinacé, M. A., Paoli, M. A. D. (2009).** Poli (terefalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. *Polímeros*, 19, 121-132.
- Santoni, R. L., Tingle, J. S., Webster, S. L. (2001).** Engineering properties of sand-fiber mixtures for road construction. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 127(3), 258-268.
- Satı, Y. (2016).** Sıkıştırılmış ince daneli zeminlerin kayma mukavemetinin drenajlı koşullarda incelenmesi. (*Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü*).
- Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F., Cai, Y. (2007).** Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(3), 194-202.
- Trindade, T. P., Iasbik, I., de Lima, D. C., Minette, E., de Carvalho Silva, C. H., de Carvalho, C. A. B., Machado, C. C. (2006).** Estudos laboratoriais do comportamento de um solo residual arenoso reforçado com fibras de polipropileno, visando à aplicação em Estradas Florestais. *Revista Árvore*, 30(2), 215-221.
- Unnikrishnan, N., Rajagopal, K., Krishnaswamy, N. R. (2002).** Behaviour of reinforced clay under monotonic and cyclic loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 20(2), 117-133.
- Waldron, L. J. (1977).** The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Science Society of America Journal*, 41(5), 843-849.
- Wang, Y. (1999).** Utilization of recycled carpet waste fibers for reinforcement of concrete and soil. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 38(3), 533-546.
- Wu, T. H. (1976).** Investigation on landslides on Prince of Wales Island. *Alaska Geotech. Rpt. No 5, Dpt. Of Civil Eng., Ohio State Univ., Columbus, USA*.