

ATIKSU ÇAMURU KÜLÜ VE POLİPROPİLEN FİBER KATKILARININ KUMUN TAŞIMA GÜCÜNE ETKİSİ

THE EFFECT OF SEWAGE SLUDGE ASH AND POLYPROPYLENE FIBER INCLUSIONS ON BEARING CAPACITY OF SAND

Halil İbrahim FEDAKAR*¹

Hamza GÜLLÜ²

ABSTRACT

Sewage sludge ash (SSA), produced by the incineration of dewatered sewage sludge at wastewater treatment plants, causes some environmental problems such as air pollution and environmental pollution as a result of landfilling. In addition, due to rapid urbanization and population growth in recent years, the management of SSA and investigation of its reusability have become more important. Therefore, in this study, the reuse of SSA for improving the bearing capacity of polypropylene fiber (PF) reinforced poorly-graded sand was investigated through California bearing ratio (CBR) tests, commonly used for determining some design parameters for geotechnical projects such as bearing capacity. During this study, the samples with various dosage rates of SSA (0%, 10%, 15%, 20% and 30%) and PF (0%, 0.5% and 1%) were prepared. Some samples were subjected to CBR tests after a curing period of 7 days since SSA has pozzolanic properties. It is observed from CBR tests that SSA inclusion affects the bearing capacity of sand material. Furthermore, because of pozzolanic content of SSA, the cured samples yield higher CBR values in comparison to the samples with no curing. Unlike SSA, the addition of PF results in a decrease in CBR of cured samples. On the basis of the testing results obtained, it is concluded in the present study that SSA could be employed as a stabilization material for improving the bearing capacity of sand.

Keywords: California bearing ratio; polypropylene fiber; poorly-graded sand; sewage sludge ash.

ÖZET

Atıksu arıtma tesislerinde, kurutulmuş atıksu çamurunun yakılması ile elden edilen atıksu çamuru külü (AÇK), beraberinde depolamanın (landfilling) da sonucu olarak hava kirliliği ve çevre kirliliği gibi bazı çevresel sorunlara neden olmaktadır. Ayrıca, son yıllardaki hızlı kentleşme ve nüfus artışından dolayı, AÇK'nın yönetimi ve yeniden kullanılabilirliğinin araştırılması daha da önem kazanmaktadır. Bundan dolayı, bu çalışmada, AÇK'nın polipropilen fiber (PF) ile güçlendirilmiş kötü derecelenmiş kumun taşıma gücünün iyileştirilmesinde kullanılabilirliği, geoteknik projeler için taşıma kapasitesi gibi bazı tasarım parametrelerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri ile araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, farklı oranlarda AÇK (%0, %10, %15, %20 ve %30) ve PF (%0, %0,5 ve %1) içeren numuneler hazırlanmıştır. Kullanılan AÇK puzolanik bir malzeme olduğundan, kür etkisini incelemek için, bazı numuneler 7 günlük kürlenme süresinden sonra CBR deneyine tabi tutulmuştur. Yapılan CBR deneylerinde, AÇK

*¹ Arş. Gör. Dr., Abdullah Gül Üniversitesi, halilibrahim.fedakar@agu.edu.tr (Yazışma yapılacak yazar)

² Doç. Dr., Gaziantep Üniversitesi, hgullu@gantep.edu.tr

kullanımının, kumun taşıma gücünü etkilediği gözlenmiştir. Ayrıca, AÇK'nın pozolanik içeriğinden dolayı, küre maruz bırakılan numunelerde, kürsüz numunelere kıyasla daha fazla CBR değeri elde edilmiştir. AÇK'nın aksine, PF katkısı, küre maruz kalan numunelerin CBR değerlerinde bir azalmaya sebep olmuştur. Elde edilen deney sonuçlarına dayanarak, bu çalışmada, AÇK'nın, kumun taşıma gücünü artırmak için stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Atıksu çamuru külü; Kaliforniya taşıma oranı; kötü derecelenmiş kum; polipropilen fiber.

1. GİRİŞ

Dünya genelindeki hızlı kentleşme ve nüfus artışının da etkisiyle, arıtma tesislerinde elde edilen atıksu çamuru miktarlarında önemli bir artış söz konusudur. Muhtemelen, bu artış yakın gelecekte de artmaya devam edecektir. Bundan dolayı, atıksu çamurunun doğru bir şekilde yönetiminin önemi daha da artmaktadır. Bu amaçla, çeşitli bertaraf yöntemleri uygulanmaktadır. Yakma, bu yöntemlerden biridir ve atıksu çamuru hacminde önemli miktarda bir azalma sağlamaktadır (Kütük ve Aksoy, 2013). Ayrıca, yakma yöntemi, atıksu çamurunun çevreye olan potansiyel zararlarını da azaltmaktadır. Ancak, atıksu çamurunun yakılması işlemi, atıksu çamuru külü (AÇK) adında yeni bir atık malzemenin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Arıtma tesislerinde elde edilen AÇK'nın, atık toplama alanlarında depolanması hem çevresel açıdan hem de atık toplama için ayrılmış alanların sınırlı olmasından dolayı önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bunun yerine, geçtiğimiz yirmi yıl içerisinde, AÇK'nın yapı malzemesi (çevreci beton, hafif agrega, tuğla vb.) üretiminde kullanımına yönelik çalışmalarda bir artış söz konusudur (Anderson ve diğ., 1996; Monzó ve diğ., 1996; Wang ve diğ., 2005; Devant ve diğ., 2011).

Ayrıca, son yıllarda, araştırmacılar AÇK'nın zemin stabilizasyon malzemesi olarak kullanımına yönelik çalışmalar da gerçekleştirmişlerdir (Lin ve diğ., 2005, 2007a, 2007b; Chen ve Lin, 2009; Gullu ve Fedakar, 2016, 2017a, 2017b). Lin ve diğ. (2005) yaptıkları çalışmada, AÇK'nın stabilizasyon malzemesi olarak kullanımının, yumuşak zeminin serbest basınç dayanımını ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) performanslarını arttırdığını ve şişme potansiyelini azalttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, AÇK malzemesinin, zemin stabilizasyon uygulamalarında yaygın olarak kullanılan çimento, kireç ve uçucu kül ile beraber yumuşak zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için kullanımına yönelik çalışmalar da literatürde mevcuttur (Lin ve diğ., 2007a, 2007b; Chen ve Lin, 2009). Lin ve diğ. (2007a, 2007b) ve Chen ve Lin (2009) AÇK+kireç, AÇK+çimento ve AÇK+uçucu kül karışımlarını yumuşak zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için kullanmışlardır. Bu çalışmalarda, araştırmacılar, AÇK+kireç, AÇK+çimento ve AÇK+uçucu kül karışımlarının yumuşak zemine ilave edilmesi durumunda, zeminin kayma dayanımı parametresi olan kohezyon değerini artırdığını ve CBR performansını iyileştirdiğini bulmuşlardır. AÇK üzerine gerçekleştirilen diğer çalışmalar da (Gullu ve Fedakar, 2016, 2017a, 2017b), AÇK malzemesinin pozolanik içeriğinden dolayı, iri daneli zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için de kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Geleneksel bağlayıcıların (çimento, kireç, uçucu kül, AÇK) yanı sıra, son yıllarda, bir çok araştırmacı, zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için fiber malzeme gibi geleneksel olmayan stabilizasyon malzemelerinin de kullanımı noktasında çok sayıda çalışma gerçekleştirmişlerdir (Kaniraj ve Havanagi, 2001; Cai ve diğ., 2006; Tang ve diğ., 2007; Park, 2009, 2011; Hazirbaba ve Gullu, 2010; Estabragh ve diğ., 2012; Correia ve diğ., 2015; Gullu

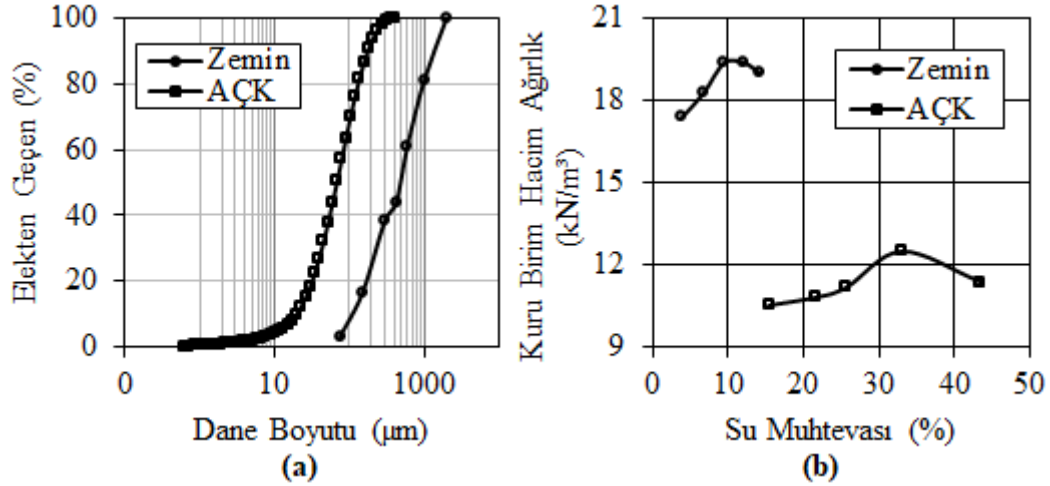
ve Fedakar, 2017b). Yapılan çalışmalar, fiber katkısından dolayı, zeminlerin dayanım, durabilite, kırılma mekanizması ve malzeme davranışı (pekleşme) gibi birçok özelliğinin iyileştiğini göstermektedir (Kaniraj ve Havanagi, 2001; Cai ve diğ., 2006; Tang ve diğ., 2007; Park, 2009, 2011; Estabragh ve diğ., 2012; Consoli ve diğ., 2010, 2011; Olgun, 2013; Hamidi ve Hooresfand, 2013; Correia ve diğ., 2015; Pino ve Baudet, 2015). Zemin stabilizasyonu uygulamalarında, en çok kullanılan fiber malzeme polipropilen fiberdir (Puppala ve Musenda, 2000; Santoni ve diğ., 2001; Yetimoglu ve Salbas, 2003; Khattak ve Alrashidi, 2006; Viswanadham ve diğ., 2009; Hejazi ve diğ., 2012).

Literatürde, atıksu çamuru külü stabilizasyon malzemesi olarak daha çok yumuşak zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için kullanılmıştır (Lin ve diğ., 2005, 2007a, 2007b; Chen ve Lin, 2009). Atıksu çamuru külünün iri daneli malzemeler ile kullanımı noktasında ise daha az çalışma mevcuttur (Gullu ve Fedakar, 2016, 2017a, 2017b). Zemin stabilizasyon uygulamalarında, Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri, karışımların taşıma kapasitesi ve dayanım gibi tasarım parametrelerinin belirlenmesinde yoğun olarak kullanılmasına rağmen (Pandian ve Krishna, 2002; Hazirbaba ve Gullu, 2010; Chore ve diğ., 2011; Khalid ve diğ., 2014), yazarların bilgisine göre, atıksu çamuru külü ve polipropilen fiber karışımlarının kötü derecelenmiş kumun CBR davranışı üzerindeki etkilerini inceleyen bir çalışma literatürde bulunmamaktadır. Bu çalışma ile, literatürdeki eksikliğin giderilmesinin yanı sıra, atıksu çamuru külü malzemesinin yönetimine ve sürdürülebilirliğe katkıda bulunması amaçlanmaktadır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Malzemeler

Bu çalışmada, 10 nolu elekten (2.00 mm) geçen iri daneli zemin kullanılmıştır. Kullanılan zemini tanımlamak için elek analizi, modifiye proktor ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Zeminin elek analizi ve modifiye proktor test eğrileri şekil 1’de verilmiştir. Elek analizi deneyinden, zeminin ince dane oranı, üniformluk ve eğrilik katsayıları sırasıyla %3, 4.46 ve 0.76 olarak bulunmuştur. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre (USCS), deneysel çalışmada kullanılan zemin kötü derecelenmiş kum (SP) olarak sınıflandırılmıştır. Ayrıca, diğer deney sonuçlarından, zeminin optimum su muhtevası, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve özgül ağırlığı ise sırasıyla %10, 19.5 kN/m³ ve 2.78 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada kullanılan atıksu çamuru külü (AÇK), Gaziantep Büyükşehir Belediyesi tarafından işletilen atıksu arıtma tesisinde, atıksu çamurunun susuzlaştırma işleminden sonra yaklaşık 850°C’de yakılması sonucu elde edilmiştir. AÇK malzemesinin bazı kimyasal ve fiziksel özelliklerini belirlemek için kimyasal analiz, lazer kırınım (Malvern Mastersizer Hydro 2000U), modifiye proktor ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. AÇK’nın dane dağılımı ve proktor test sonuçları şekil 1’de gösterilmiştir. Proktor ve özgül ağırlık deney sonuçlarından, AÇK malzemesinin optimum su muhtevası, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve özgül ağırlığı sırasıyla %33, 12.5 kN/m³ ve 2.44 olarak elde edilmiştir. AÇK’nın bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri ise tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’deki sonuçlara göre, AÇK malzemesinin kimyasal içeriğinde bulunan kalsiyum, kalsiyum silikat yada alüminyum silikat üretebilmektedir (Lin ve diğ., 2007a). Ayrıca, AÇK’nın kimyasal bileşimindeki CaO, puzolanik reaksiyonları hızlandırmaktadır. Çalışmada kullanılan polipropilen fibere (PF) ait malzeme özellikleri tablo 2’de sunulmuştur.



Şekil 1. Zeminin ve AÇK'nın (a) Elek Analizi ve (b) Proktor Test Sonuçları

Tablo 1. AÇK'nın Bazı Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Özellik	AÇK
CaO (%)	33.38
SiO ₂ (%)	24.18
Al ₂ O ₃ (%)	7.44
Fe ₂ O ₃ (%)	4.29
MgO (%)	8.26
SO ₃ (%)	11.17
P ₂ O ₅ (%)	1.74
K ₂ O (%)	2.74
Kızdırma kaybı (%)	4.53
Özgül yüzey alanı (m ² /g)	0.199
Yüzey ağırlıklı ortalama (µm)	30.077
Hacim ağırlıklı ortalama (µm)	86.067

Tablo 2. PF'nin Özellikleri

Özellik	PF
Uzunluk (mm)	20
Çap (mm)	0.016
Özgül ağırlık	0.91
Çekme dayanımı (MPa)	300-400
Elastisite modülü (MPa)	4000
Erime sıcaklığı (°C)	185
Tutuşma sıcaklığı (°C)	365
Su emme kapasitesi (%)	0

2.2. Numune Hazırlama

Test sonuçlarının doğruluğu, fiberli malzeme karışımının hazırlanması ile yakından ilgilidir. Tingle ve diğ. (1999) ve Consoli ve diğ. (2010) su katkısından önce fiberlerin ilave edilmesinin, karışım esnasında fiberlerin birbirlerine yapışması ve su yüzeyinde kalması gibi

sorunlara sebep olduğunu çalışmalarında belirtmişlerdir. Bundan dolayı, bu çalışmada, kum+AÇK karışımlarına su katkısından sonra PF ilave edilmiştir. Kum+AÇK karışımına ilave edilecek su miktarı, kumun optimum su muhtevasına (%10) göre belirlenmiştir. Karışım hazırlanırken şu adımlar takip edilmiştir: i) Önceden belirlenen miktarda AÇK'nın kuru kuma ilave edilmesi ve karıştırılması, ii) karışımın (kum+AÇK) kuru ağırlığının %10'u oranında suyun karışıma ilave edilmesi ve karıştırılması ve iii) önceden belirlenmiş oranlarda PF'nin kum+AÇK+su karışımına ilave edilmesi ve karıştırılması. Uygulanan karıştırma işlemleri, plastik bir kap içerisinde manuel olarak yapılmıştır. Karışımlarda kullanılan katkı oranları, AÇK için %10, %15, %20 ve %30 ve PF için ise %0.5 ve %1'dir. Maliyetinden dolayı, PF'nin katkı oranının üst limiti %1 olarak belirlenmiştir. Karışımdaki katkı miktarları, kum+AÇK karışımının kuru ağırlığına göre belirlenmiştir.

2.3. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR)

Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi, zeminlerin stabilizasyonu, temel tasarımı, esnek yol tasarımı gibi inşaat mühendisliği uygulamalarında malzemelerin tasarım parametrelerini (taşıma kapasitesi) belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Pandian ve Krishna, 2002; Hazirbaba ve Gullu, 2010; Chore ve diğ., 2011; Khalid ve diğ., 2014; Look, 2014).

Bu çalışmada, CBR deneyleri ASTM D1883 standardına uygun olarak şu konfigürasyonlar için gerçekleştirilmiştir: i) Kum, ii) Kum+AÇK, iii) Kum+PF ve iv) Kum+AÇK+PF. Ancak, üçüncü konfigürasyonda, PF malzemesi puzolanik malzeme olmadığı için, CBR deneyleri kürsüz şartlarda yapılmıştır. Malzemelerin katkı oranlarını ve numune kompozisyonlarını gösteren deney programı tablo 3'te sunulmuştur. Deneysel çalışma boyunca, bütün drenaj sistemlerinin sağlandığı ve pratikte doymamış durumların geçerli olduğu kabul edilerek, CBR deneyleri suya batırılmadan yapılmıştır.

Tablo 3. CBR Deney Programı

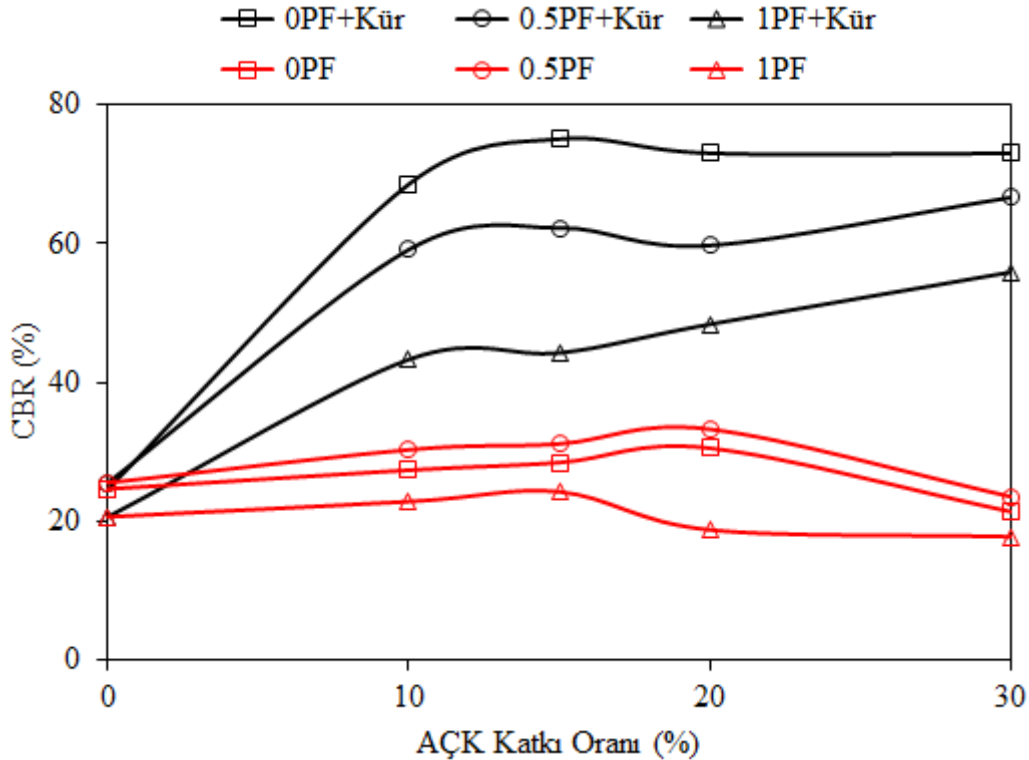
Karışım	Kum (%)	AÇK (%)	PF (%)	Kür Süresi	
				0 Gün	7 Gün
100K	100	0	0	Evet	Hayır
100K+0.5PF	100	0	0.5	Evet	Hayır
100K+1PF	100	0	1	Evet	Hayır
90K+10AÇK	90	10	0	Evet	Evet
85K+15AÇK	85	15	0	Evet	Evet
80K+20AÇK	80	20	0	Evet	Evet
70K+30AÇK	70	30	0	Evet	Evet
90K+10AÇK+0.5PF	90	10	0.5	Evet	Evet
85K+15AÇK+0.5PF	85	15	0.5	Evet	Evet
80K+20AÇK+0.5PF	80	20	0.5	Evet	Evet
70K+30AÇK+0.5PF	70	30	0.5	Evet	Evet
90K+10AÇK+1PF	90	10	1	Evet	Evet
85K+15AÇK+1PF	85	15	1	Evet	Evet
80K+20AÇK+1PF	80	20	1	Evet	Evet
70K+30AÇK+1PF	70	30	1	Evet	Evet

K: Kum

3.BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

3.1. AÇK Katkısının CBR Üzerindeki Etkisi

Kumun CBR performansının AÇK miktarı ve kürlenme ile değişimi şekil 2’de gösterilmiştir. CBR değerlerinin AÇK katkı oranı ve kürlenmeden etkilendiği şekil 2’de görülmektedir. Bu etki, kürlü şartlarda önemli olurken, kürsüz şartlarda çok az olmaktadır. Kürsüz durumda, yüksek oranlarda (>%20) AÇK içeren kum+AÇK karışımlarının CBR performansları azalmaktadır. Bu durum, AÇK malzemesinin daha çok dane boyutundan dolayı ince daneli malzeme gibi davranması ve puzolanik reaksiyonların zamana bağımlı olması olabilir (Ramachandran, 1995; Maneli ve diğ., 2014). Gullu ve Fedakar (2016) çalışmalarında CBR deneylerini kürsüz şartlarda yapmışlardır. Çalışmalarında, Gullu ve Fedakar (2016), %15’e kadar AÇK katkısının siltli kumun CBR değerini iyileştirdiğini ve %15’den fazla AÇK kullanımının ise siltli kumun CBR değerini azalttığını bulmuşlardır. Ayrıca, aynı çalışmada, CBR değerindeki bu azalma eğiliminin AÇK miktarındaki artış ile daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Kürsüz şartların aksine, küre maruz numunelerin CBR değerlerinde zaman içerisinde oluşan puzolanik reaksiyonların etkisi ile önemli bir iyileşme meydana gelmektedir. Kürlü durum için, %15 AÇK içeren kum+AÇK karışımı maksimum CBR performansını vermektedir. Ancak, kürlü ve kürsüz durumlar göz önüne alındığında, CBR değerlerindeki en fazla değişim %30 AÇK içeren karışımda meydana gelmiştir.



Şekil 2. Kumun CBR Performansının AÇK ve PF Miktarları ve Kür Durumu ile Değişimi

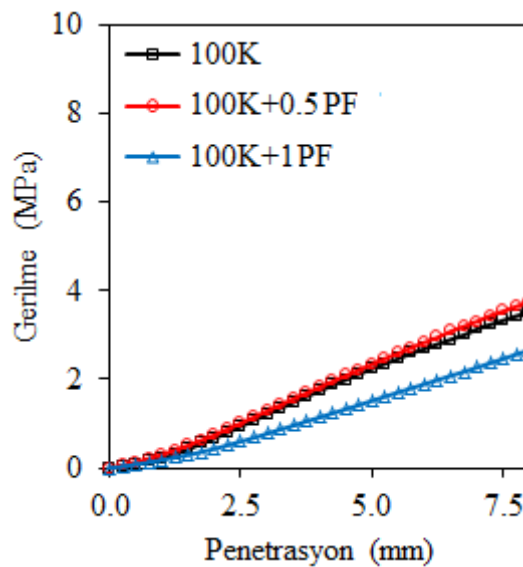
3.2. AÇK ve PF Katkısının CBR Üzerindeki Etkisi

CBR değerlerinin AÇK ve PF katkı oranları ve kürlenme durumu ile değişimi şekil 2’de verilmiştir. Şekil 2’deki sonuçlara göre, kürlü ve kürsüz durumlarda PF katkısı, kumun ve

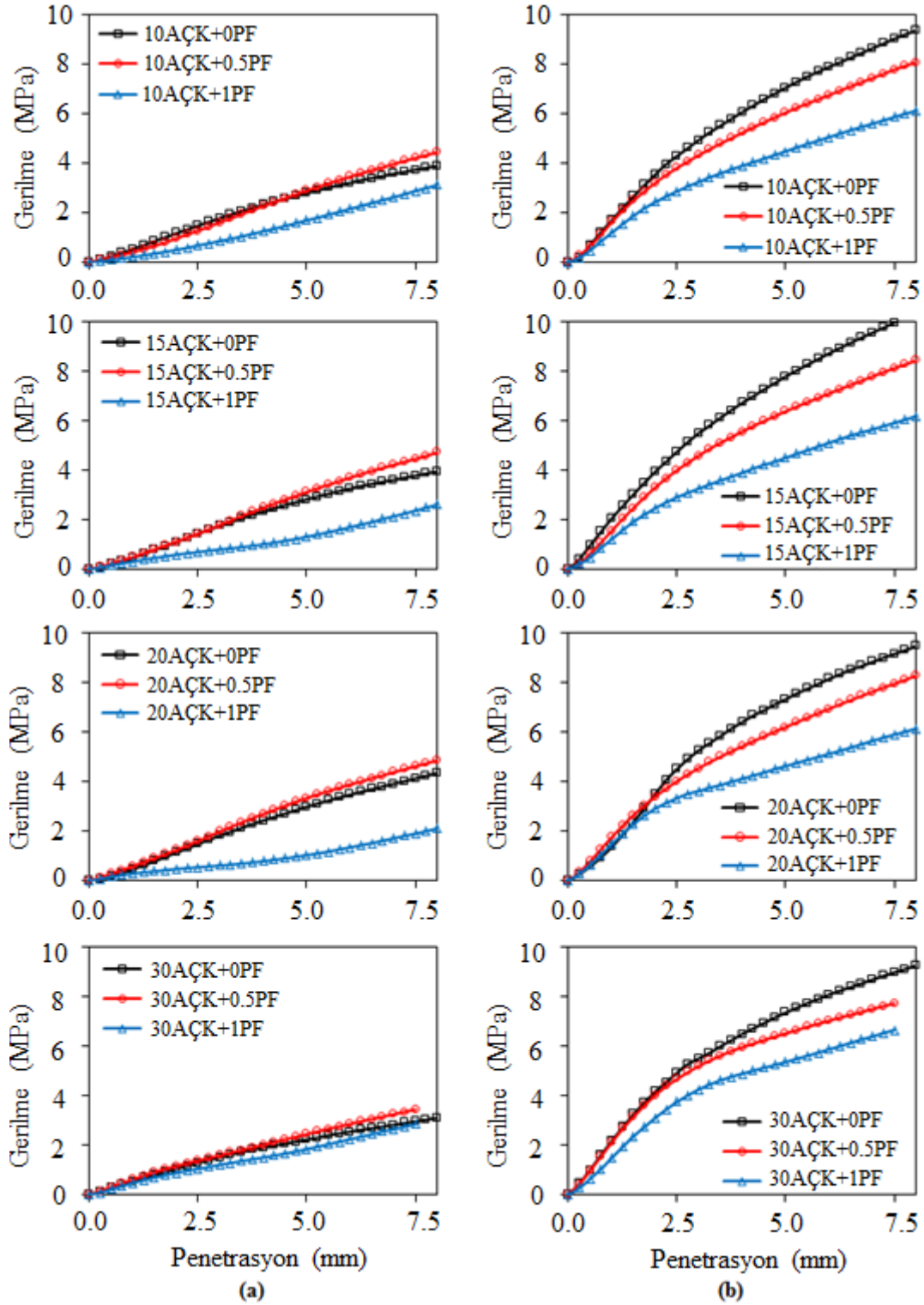
kum+AÇK karışımlarının CBR değerlerini etkilemektedir. Bu etki, kürsüz durumlarda daha azdır. Yetimoglu ve diğ. (2005) kumun başlangıç dayanımının fiber malzeme katkısı ile kayda değer bir şekilde değişmediğini çalışmalarında bulmuşlardır. Ancak, küre maruz kalan numuneler için PF ilavesinin CBR değeri üzerindeki etkisi daha fazladır. Ayrıca, CBR değerlerinde meydana gelen bu değişim PF katkı oranı ile yakından ilgilidir. Kürsüz şartlarda, %0.5'e (\leq %0.5) kadar PF ilavesi CBR değerlerini artırırken; %0.5'ten daha fazla oranda ($>$ %0.5) PF kullanımı CBR değerlerini azaltmaktadır. Bu azalma, fiber malzemelerin birbirleri ile olan temas yüzeyinin artması, daha az sürtünmeden dolayı fiber malzemelerin birbirleri üzerinde kayması ve zımbalama kayma direncinin azalması olarak açıklanabilir (Hazirbaba ve Gullu, 2010; Fletcher ve Humphries, 1991). Kürsüz şartlardaki davranışın aksine, kürlü şartlarda, fiber oranındaki artış, karışımların (kum+AÇK) CBR performansını olumsuz etkilemektedir. Bu olumsuz etki, kum+AÇK karışımının dayanımındaki azalmadan kaynaklanabilir. Ancak, bazı araştırmacılar (Ayyappan ve diğ., 2010; Chore ve diğ., 2011; Şenol, 2012, Gümüşer ve Şenol, 2014), zemin+uçucu kül karışımına fiber katkısının CBR değerini arttırdığını ve bu artışın fiber uzunluğuna ve katkı malzemelerinin miktarlarına bağlı olduğunu rapor etmişlerdir. Fiber katkısı ile CBR değerindeki azalmaya rağmen, deneysel çalışmada, fiber malzemenin yüksek çekme dayanımı ve süneklik özelliğinden dolayı testin sonunda numunelerin tekrar eski durumlarına dönme eğilimlerinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

3.3. PF Katkısının Gerilme-Penetrasyon Üzerindeki Etkisi

Kum+PF ve kum+AÇK+PF karışımları için elde edilen gerilme-penetrasyon eğrileri sırası ile şekil 3-4'de verilmiştir. Şekil 3'deki deney sonuçlarından, %0.5 oranında PF katkısının kumun gerilme-penetrasyon performansını kısmen iyileştirdiği görülmektedir. Ancak, ilave edilen PF miktarının artması ile ($>$ %0.5), kumun gerilme-penetrasyon davranışı olumsuz etkilenmektedir. Bu davranışın muhtemel nedeni, karışım içerisindeki fiber oranındaki artışa bağlı olarak fiberlerin birbirleri ile olan temas yüzeyini artması ve artan fiber temas yüzeyi ile beraber karışımın zımbalama kayma direncinin azalması olabilir (Hazirbaba ve Gullu, 2010; Fletcher ve Humphries, 1991).



Şekil 3. Kum ve Kum+PF Karışımlarının Gerilme-Penetrasyon Davranışları



Şekil 4. (a) Kürsüz ve (b) Kürlü Şartlarda Kum+AÇK+PF Karışımlarının Gerilme-Penetrasyon Davranışları

Kum+AÇK+PF karışımlarının gerilme-penetrasyon davranışları şekil 4’de verilmiştir. Şekil 4’e göre, kum+AÇK+PF karışımları kürsüz şartlarda kum+PF karışımlarına benzer davranışlar sergilemektedir. Kürlü şartlarda ise, PF katkısı karışımın (kum+AÇK) gerilme-penetrasyon davranışını olumsuz olarak etkilemektedir. Kürlü şartlarda, PF katkısından dolayı, daha az yük ile daha fazla penetrasyon değeri elde edilmiştir. Ayrıca, şekil 4’de,

kum+AÇK karışımlarının başlangıç dayanımındaki değişikliğin %1 oranında PF katkısı ile daha belirgin olduğu görülmektedir.

4.SONUÇLAR

Bu çalışmada, atıksu çamuru külü (AÇK) ve polipropilen fiber (PF) katkı malzemelerinin kumun CBR ve gerilme-penetrasyon davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmadan çıkarılan sonuçlar şunlardır:

- Stabilizasyon malzemesi olarak AÇK'nın kullanımı, kumun CBR ve gerilme-penetrasyon performansını etkilemektedir. Üstelik, bu etki, AÇK'nın puzolanik özelliğinden dolayı kür şartları altında daha önemli olmaktadır. Ancak, kürsüz şartlarda, penetrasyon direnci puzolanik reaksiyon ile oluşan kimyasal bağlardan ziyade, içsel sürtünme açısı ve kohezyon gibi dayanım parametreleri tarafından yönetildiği için kumun CBR ve gerilme-penetrasyon davranışı daha az etkilenmektedir. Küre maruz bırakılan numunelerde, çalışmada kullanılan bütün AÇK miktarları (%10, %15, %20 ve %30) için, CBR değerlerinde önemli bir iyileşme elde edilmiştir. Fakat, kürsüz şartlarda, AÇK katkısının kumun CBR performansı üzerindeki etkisi daha az olmaktadır.
- PF katkısı, kum+AÇK karışımlarının gerilme-penetrasyon ve CBR performanslarını etkilemektedir. Bu etki, kürsüz şartlar ile kıyaslandığında, kürlü şartlar altında daha fazla olmaktadır. Kürsüz durumda, %0.5 oranında PF ilavesi, sürtünme yüzey alanındaki artıştan dolayı CBR değerini artırmaktadır. Ancak, %1 oranında PF katkısı ise fiber malzemelerin birbirleri ile olan temas yüzeyinin artmasından dolayı CBR değerini azaltmaktadır. Kürlü durumda ise, PF miktarındaki artış ile kum+AÇK karışımlarının CBR değerlerinde azalma meydana gelmektedir. %30 AÇK içeren kum+AÇK+PF karışımları, bu çalışmada kullanılan bütün fiber oranlarında, %50'den daha fazla CBR değeri vermektedir. Ayrıca, %0.5 PF içeren kum+AÇK+PF karışımları, bütün AÇK oranlarında %50'den daha fazla CBR değerine sahiptir. %1 PF katkısından dolayı CBR değerlerinde meydana gelen azalma %30'dan az oranlarda AÇK kullanımı durumunda daha önemli olmaktadır.
- Elde edilen CBR deney sonuçlarından, AÇK malzemesinin puzolanik özelliğinden dolayı zemin stabilizasyon ve ulaştırma geotekniği uygulamalarında PF ve kum ile beraber kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Kütük, M.A., ve Aksoy, M., “A Case Study on Sewage Sludge Incineration Plant: Gaski”, Proceedings of the Second International Conference on Water, Energy and the Environment, 21-24 Eylül 2013, Kuşadası.
- [2] Anderson, M.R., Skerratt, R.G., Thomas, J.P. ve Clay, S.D. (1996), “Case Study Involving Using Fluidized Bed Incinerator Sludge Ash as a Partial Clay Substitute in Brick Manufacture”, Water Science and Technology, Vol 34(3-4), 507–515.
- [3] Monzó, J., Payá, J., Borrachero, M.V. ve Córcoles, A. (1996), “Use of Sewage Sludge Ash (SSA)-Cement Admixtures in Mortars”, Cement and Concrete Research, Vol 26, 1389-1398.

- [4] Wang, K.S., Chiou, I.J., Chen, C.H. ve Wang, D. (2005), “Lightweight Properties and Pore Structure of Foamed Material Made from Sewage Sudge Ash”, *Construction and Building Materials*, Vol 19, 627–633.
- [5] Devant, M., Cusidó, J.A. ve Soriano, C. (2011), “Custom Formulation of Red Ceramics with Clay, Sewage Sludge and Forest Waste”, *Applied Clay Science*, Vol 53, 669–675.
- [6] Lin, D.F., Luo, H.L., Hsiao, D.H. ve Yang, C.C. (2005), “The Effects of Sludge Ash on The Strength of Soft Subgrade Soil”, *Journal of the Chinese Institute of Environmental Engineering*, Vol 15(1), 1-10.
- [7] Lin, D.F., Lin, K.L., Hung, M.J. ve Luo, H.L. (2007a), “Sludge Ash/Hydrated Lime on The Geotechnical Properties of Soft Soil”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol 145(1-2), 58-64.
- [8] Lin, D.F., Lin, K.L. ve Luo, H.L. (2007b), “A Comparison Between Sludge Ash and Fly Ash on The Improvement in Soft Soil”, *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol 57(1), 59-64.
- [9] Chen, L. ve Lin, D.F. (2009), “Stabilization Treatment of Soft Subgrade Soil by Sewage Sludge Ash and Cement”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol 162, 321-327.
- [10] Gullu, H. ve Fedakar, H.I. (2016), “Use of Factorial Experimental Approach and Effect Size on The CBR Testing Results for The Usable Dosages of Wastewater Sludge Ash with Coarse-Grained Material”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-22. DOI: 10.1080/19648189.2016.1179678
- [11] Gullu, H. ve Fedakar, H.I. (2017a), “Response Surface Methodology for Optimization of Stabilizer Dosage Rates of Marginal Sand Stabilized with Sludge ash and Fiber Based on UCS Performances”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol 21 (5), 1717-1727.
- [12] Gullu, H. ve Fedakar, H.I. (2017b), “Unconfined Compressive Strength and Freeze-Thaw Resistance of Sand Modified With Sludge Ash and Polypropylene Fiber”, *Geomechanics and Engineering*, Vol 13(1), 25-41.
- [13] Kaniraj, S.R. ve Havanagi, V.G. (2001), “Behavior of Cement-Stabilization Fiber-Reinforced Fly Ash-Soil Mixtures”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 127, 574–584.
- [14] Cai, Y., Shi, B., Ng, C.W.W. ve Tang, C.S. (2006), “Effect of Polypropylene Fibre and Lime Admixture on Engineering Properties of Clayey Soil”, *Engineering Geology*, Vol 87(3-4), 230–240.
- [15] Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F. ve Cai, Y. (2007), “Strength and Mechanical Behavior of Short Polypropylene Fiber Reinforced and Cement Stabilized Clayey Soil”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 25(3), 194–202.
- [16] Park, S. (2009), “Effect of Fiber Reinforcement and Distribution on Unconfined Compressive Strength of Fiber-Reinforced Cemented Sand”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 27(2), 162-166.
- [17] Park, S. (2011), “Unconfined Compressive Strength and Ductility of Fiber-Reinforced Cemented Sand”, *Construction and Building Materials*, Vol 25(2), 1134-1138.

- [18] Hazirbaba, K. ve Gullu, H. (2010), “California Bearing Ratio Improvement and Freeze-Thaw Performance of Fine-Grained Soils Treated with Geofiber and Synthetic Fluid”, *Cold Regions Science and Technology*, Vol 63, 50-60.
- [19] Estabragh, A.R., Namdar, P. ve Javadi, A.A. (2012), “Behavior of Cement-Stabilized Clay Reinforced with Nylon Fiber”, *Geosynthetics International*, Vol 19(1), 85–92.
- [20] Correia, A.A.S., Oliveira, P.J.V. ve Custodio, D.G. (2015), “Effect of Polypropylene Fibres on The Compressive and Tensile Strength of a Soft Soil, Artificially Stabilised with Binders”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 43(2), 97-106.
- [21] Consoli, N.C., Bassani, M.A.A. ve Festugato, L.A. (2010), “Effect of Fiber-Reinforcement on The Strength of Cemented Soils”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 28(4), 344–351.
- [22] Consoli, N.C., Zortea, F., Souza, M. ve Festugato, L. (2011), “Studies on The Dosage of Fiber-Reinforced Cemented Soils”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol 23(12), 1624–1632.
- [23] Olgun, M. (2013), “Effects of Polypropylene Fiber Inclusion on The Strength and Volume Change Characteristics of Cement-Fly Ash Stabilized Clay Soil”, *Geosynthetics International*, Vol 20(4), 263–275.
- [24] Hamidi, A. ve Hooresfand, M. (2013), “Effect of Fiber Reinforcement on Triaxial Shear Behavior of Cement Treated Sand”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 36, 1-9.
- [25] Pino, L.F.M. ve Baudet, B.A. (2015), “The Effect of The Particle Size Distribution on The Mechanics of Fibre-Reinforced Sands Under One-Dimensional Compression”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 43(3), 250–258.
- [26] Puppala, A.J. ve Musenda, C., “Effects of Fiber Reinforcement on Strength and Volume Change Behavior of Expansive Soils”, *Transportation Research Board 79th Annual Meeting*, Washington DC, 2000.
- [27] Santoni, L., Tingle, S. ve Webster, L. (2001), “Engineering Properties of Sand–Fiber Mixtures for Road Construction”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 127, 258–268.
- [28] Yetimoglu, T. ve Salbas, O. (2003), “A Study on Shear Strength of Sands Reinforced with Randomly Distributed Discrete Fibers”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 21, 103–110.
- [29] Khattak, J. ve Alrashidi, M. (2006), “Durability and Mechanistic Characteristics of Fiber Reinforced Soil–Cement Mixtures”, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol 7, 53–62.
- [30] Viswanadham, S., Phanikumar, R. ve Mukherjee, V. (2009), “Swelling Behavior of A Geofiber Reinforced Expansive Soil”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 27, 73–76.
- [31] Hejazi, S.M., Sheikzadeh, M., Abtahi, S.M. ve Zadhoush, A. (2012), “A Simple Review of Soil Reinforcement By Using Natural and Synthetic Fibers”, *Construction and Building Materials*, Vol 30, 100-116.
- [32] Pandian, N.S. ve Krishna, K.C. (2002), “California Bearing Ratio Behavior of Cement-Stabilized Fly Ash-Soil Mixes”, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol 30, 492-496.

- [33] Chore, H.S., Kumthe, A.A., Abnave, S.B., Shinde, S.S., Dhole, S.S. ve Kamerkar, S.G. (2011), “Performance Evaluation of Polypropylene Fibers on Sand-Fly Ash Mixtures in Highways”, *Journal of Civil Engineering (IEB)*, Vol 39(1), 91–102.
- [34] Khalid, N., Arshad, M.F., Mukri, M., Kamarudin, F. ve Abdul Ghani, A.H. (2014), “The California Bearing Ratio (CBR) Value for Banting Soft Soil Subgrade Stabilized Using Lime-Pofa Mixtures”, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol 19, 155–163.
- [35] Tingle, J.S., Webster, S.L., Santoni, R.L. (1999), “Discrete Fiber Reinforcement of Sands for Expedient Road Construction”, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Proje No: GL-99-3.
- [36] Look, B.G. (2014), “Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables”, 2nd Edition, CRC Press, London.
- [37] Ramachandran, V.S. (1995), “Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science, and Technology”, 2nd Edition, Noyes Publications, New Jersey, USA.
- [38] Maneli, A., Kupolati, W.K., Ndambuki, J.M. ve Abiola, O.S. (2014), “Influence of Curing Time and Compaction on Black Cotton Soil Stabilized with Fly Ash, Ground-Franulated Blast Furnace Slag and Lime”, *Construction Materials and Structures*, IOS Press, pp 575-580. DOI: 10.3233/978-1-61499-466-4-575.
- [39] Yetimoglu, T., Inanir, M. ve Inanir, E. (2005), “A Study on Bearing Capacity of Randomly Distributed Fiber-Reinforced Sand Fills Overlying Soft Clay”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 23, 174–183.
- [40] Fletcher, C.S. ve Humphries, W.K. (1991), “California Bearing Ratio Improvement of Remolded Soils By The Addition of Polypropylene Fiber Reinforcement”, *Transportation Research Record*, Vol 1295, 80–86.
- [41] Ayyappan, S., Hemalatha, K. ve Sundaram, M. (2010), “Investigation of Engineering Behavior of Soil, Polypropylene Fibers and Fly Ash-Mixtures for Road Construction”, *International Journal of Environmental Science and Development*, Vol 1(2), 171–175.
- [42] Şenol, A. (2012), “Effect of Fly Ash and Polypropylene Fibres Content on The Soft Soils”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol 71(2), 379–387.
- [43] Gümüşer, C. ve Şenol, A. (2014), “Effect of Fly Ash and Different Lengths of Polypropylene Fibers Content on The Soft Soils”, *International Journal of Civil Engineering Transaction B: Geotechnical Engineering*, Vol 12(2), 134–145.