

Araştırma Makalesi - Research Article

Atık Porselen Karonun (APK) Kil Zeminlerin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi

Effect of Waste Porcelain Tile (APK) on Physical and Mechanical Properties of Clay Soils

Semiha Poyraz^{1*}, Nazile Ural²

Geliş / Received: 04/02/2022

Revize / Revised: 15/05/2022

Kabul / Accepted: 22/07/2022

ÖZ

Atıkların geoteknik alanında değerlendirilerek tekrar kullanılması ekonomik ve etkili çözümler sağlayabilmenin yanı sıra tükenmekte olan kaynakların kullanımını azaltarak sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada %0, %5, %10, %15 ve %25 oranında atık porselen karonun (APK) kil zemine ilave edilmesiyle killi zeminlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda APK, kil zeminin likit limit değerinin %25, plastik limit değerinin %22 ve plastisite indisi değerinin de %30'a yakın oranlarda azalmasını sağlamıştır. APK eklenmesiyle kuru birim hacim ağırlık değerinde 1,71 g/cm³ değerinden 1,74 g/cm³ değerine yükseliş, optimum su muhtevası değerinde %15 oranında gerileme görülmüştür. CBR oranı %4 değerinden %10 değerine yükselerek taşıma değerinde artış sağlanmıştır. Serbest basınç dayanımını %44 civarında arttırarak taşıma gücünü iyileştirdiği sonucuna ulaşılmıştır. APK katkısının kilinkonsolidasyon özelliklerini iyileştirdiği ve şişme-sıkışma davranışını kontrol altına almada olumlu katkı sağladığı görülmüştür. Konsolidasyon katsayısı (c_v) değeri, APK oranının artmasıyla 3 kata ulaşan artış göstermiştir. Hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) %90 oranında azalmıştır. Geçirimsizlik katsayısı (k) APK artışıyla yaklaşık 50 kat artmıştır. Bu çalışmada atık APK'nin killi zeminleri stabilize etmede kullanılabileceğinin mümkün olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Zeminlerin iyileştirilmesinde APK kullanılması teknik ve ekonomik yönden fayda sağlamanın yanı sıra atıkların çevrede birikmesi ve kirliliğe yol açması sorununa çözüm olmaktadır.

Anahtar Kelimeler- Atık Porselen Karo, Zeminlerin İyileştirilmesi, Kil

ABSTRACT

Evaluating and reusing wastes in the geotechnical field not only provides economical and effective solutions, but also contributes to sustainability by reducing the use of depleted resources. In this study, the effects of 0%, 5%, 10%, 15% and 25% waste porcelain tile (APK) on clay soils on the physical and mechanical properties of clay soils were investigated. APK reduced the liquid limit value of the clay soil by 25%, the plastic limit value by 22% and the plasticity index value by approximately 30%. With the addition of APK, the dry unit volume weight value increased from 1.71 g/cm³ to 1.74 g/cm³, and the optimum water content decreased by 15%. The CBR ratio increased from 4% to 10%, resulting in an increase in the transport value. It was concluded that by increasing the unconfined compressive strength by around 44%, it improved the bearing capacity. It was observed that the APK additive improved the consolidation properties of the clay and contributed positively to controlling the swelling-compression behavior. The consolidation coefficient value increased by 3 times with the increase in the APK ratio.

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: semiha.poyraz@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-5449-7847>)

İnşaat Bölümü İnşaat Teknolojisi Programı, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, MYO, Bilecik, Türkiye

²İletişim: nazile.ural@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-2268-842X>)

İnşaat Mühendisliği, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilecik, Türkiye

The volumetric compression coefficient decreased by 90%. The permeability coefficient increased approximately 50 times with the increase in APK. In this study, it was concluded that it is possible to use APK to stabilize clayey soils. In addition to providing technical and economic benefits, the use of APK in the improvement of soils is a solution to the problem of accumulation of wastes in the environment and causing pollution.

Keywords- *Waste Porcelain Tile, Improvement of Soils, Clay*

I. GİRİŞ

Atıklar ile ortaya çıkan kirliliğin çevre üzerine etkileri günümüzde aşırı boyutlara ulaşmış olup birçok olumsuz sonuçlar ortaya çıkmaktadır (Şekil 1). Nüfus oranındaki artış ve sanayileşmedeki hızlanma ile birlikte kaynaklarımız azalmakta ve azalan kaynakların etkili kullanıma ihtiyacı da bir o kadar önem arz etmektedir [1]. Yerleşim bölgelerinin artması ile beraber, gerekli olan proje çalışmalarının da her türlü zemin özelliklerine sahip yerlerde yapılması mecburi olmaktadır. Büyük şehirlerde ve sanayi yerleşimlerinde ortaya çıkan arsa problemi ve artan giderler sebebiyle düşük taşıma özelliği veya şişme-oturma açısından problemli zeminlerin değerlendirilmesi ve iyileştirilmesi üzerine atıkların kullanılması ile ilgili çok sayıda farklı çalışmalar başlamıştır. Bu çalışmalar sayesinde hem çevresel sorunların ortadan kaldırılmasına hem de geoteknik alanında zeminlerin iyileştirilmesine katkı sağlanmaktadır [2].



Şekil 1. Çevrede biriken çeşitli atıklar

Zayıf zeminlerin fiziksel, mekanik, hidrolik ve kimyasal yönden özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla farklı birçok teknik kullanılarak (fiziksel, kimyasal veya biyolojik vb.) stabilizasyonu sağlanmaktadır [3]. Stabilizasyon çalışmalarının temel amacı taşıma gücünün artırılması ve stabilitenin sağlanmasına yöneliktir. Bu özelliklerin iyileştirilmesinin atıklarla sağlanabilmesi hem çevresel hem de ekonomik açıdan oldukça etkili olmaktadır [4]. Günümüzde geoteknik alanında stabilizasyon çalışmalarında çeşitli sanayi atıkları kullanılmaktadır. Bu atıklara örnekler Şekil 2’de verilmiştir.



a) Pirinç kabuğu külü b) Mermer tozu c) Uçucu kül d) Çelik cürufu

Şekil 2. Çeşitli sanayi atıkları

Atıkların zeminlerin stabilizasyonunda kullanılması üzerine yapılmış çeşitli çalışmalara bakıldığında, şişme potansiyeline sahip kil zeminlerde şişmenin kontrol altına alınması ve zeminin iyileştirilmesi konusunda mermerlerin işlenmesi esnasında ortaya çıkan ve biriken mermer tozunun kullanılarak etkili çözüm sağladığı ortaya konmuştur [5]. Mermer kırığı atıklarının da özellikle yol dolgularında stabilizasyonu sağlamak amacıyla uygun bir çözüm olabileceği yapılan çalışmalar arasındadır. Mermer kırıklarının %8 oranında eklenmesiyle CBR değerinin %88 civarında arttığı görülmüştür [6]. Endüstriyel atıklardan uçucu kül yaygın olarak ortaya çıkan bir atık türüdür. Yapılan çalışmalarda zemin stabilizasyonunda uçucu kül kullanılması oldukça etkili sonuçlar ortaya çıkarmaktadır [7]. Pirinç kabuğu külünün zeminlerin stabilizasyonunda kullanılmasıyla hem fiziksel hem de

mekanik özelliklerde iyileşmeler görülmekte olup killi zeminlerde hacimsel kontrolleri sağladığı sonucuna ulaşılmıştır [8]. Ayrıca CBR değerini ve serbest basınç dayanımını arttırdığı da yapılan çalışmalar sonucunda elde edilmiştir [9]. Başka bir çalışmada da pirinç kabuğu ile birlikte şeker fabrikası atıkları kullanılmış ve serbest basınç dayanımının artmasına olumlu katkılar yaptığı sonucuna ulaşılmıştır [10]. Çimentoya oranla daha az kirletici bir malzeme olan polietilen atıkların kullanılmasıyla bir zeminin içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerinin artırılabilirdiği ortaya koyulmuştur [11]. Endüstriyel atıklardan olan çelik çürüf ve atık ticari kirecin de özellikle killi zeminlerin stabilizasyonunda önemli faydalar sağladığı görülmüştür [12]. Atık kâğıt çamuru külü zayıf zemin katmanlarında iyileştirme amacıyla kullanılmış, olumlu iyileştirmeler sağlamıştır. Yumuşak zeminlerin stabilizasyonunda kullanılarak zeminin kuru birim hacim ağırlık değerini arttırdığı ve plastisite özelliğini azalttığı görülmüştür [13]. Alçı atığı kullanılmasıyla ince daneli zeminlerin stabilizasyonu araştırılmış ve kıvam limitleri, kompaksiyon ve serbest basınç dayanımı özelliklerini iyileştirdiği sonucuna ulaşılmıştır [14]. Bir başka çalışmada ise atık plastik elyaf ile güçlendirilmiş killi/siltli zeminlere kireç ve pirinç kabuğu külü ilave edilmiştir. Bu doğrultuda basınç dayanımı ve kayma mukavemet özelliklerine olumlu yönde katkı sağladığı görülmüştür [15].

Seramik üretimi ülkemizde yıllık 550 bin ton civarında olmaktadır [16]. Yapılan araştırmalara göre üretilen seramiklerin üretim sürecinde ve sonrasında yaklaşık %30'u çöpe gitmektedir [17]. Bilecik-Kütahya-Eskişehir bölgesi seramik üretiminde %49,82'lik oranla Türkiye'nin en büyük dilimine sahiptir [16]. Bilecik ilinin seramik fabrikaları bakımından zengin bir sanayi bölgesi olması ve üretim sürecinde ve sonrasında ortaya çıkabilecek atıkların değerlendirilmesi çevre kirliliğinin önlenmesi ve geri dönüşüm açısından önem kazanmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Porselen üretimi sektöründe oluşan atıklar

Karo malzemeler seramik malzemelerden üretilen levhaların farklı ebatlarda boyutlandırılmasıyla zemin ve duvar kaplamalarında kullanılan bir yapı malzemesidir [18]. Dekoratif birçok faydası olmasına rağmen atıkları da çevreye fazlasıyla rahatsızlık vermektedir. Üretim sürecinde ve sonrasında ortaya çıkan Atık Porselen Karoların (APK) değerlendirilerek çevrede birikmesini önlemek ve aynı zamanda zeminlerin iyileştirilmesine katkıda bulunmak amacıyla killi zeminlerin stabilizasyonu üzerine etkileri araştırılmıştır. APK malzemesinin kil zeminlerin hem fiziksel hem mukavemet özelliklerine etkileri çok yönlü incelenmiştir.

II. MATERYAL VE METOT

A. Materyal

Bilecik ili Pazaryeri ilçesi bölgesinden kırmızı kil zemin örneği ve Bilecik sanayi bölgesinde bulunan Bien seramik fabrikasının seramik üretimi aşamalarında ortaya çıkan APK atık malzeme olarak seçilmiş ve deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. APK 105 °C'de kurutulduktan sonra Los Angeles aşındırma cihazında 3000 devirde öğütülmüş ve 425 µm çaplı elekten elendikten sonra kullanılmıştır (Şekil 4).



a) Kırmızı kil

b) APK parçaları

c) Öğütülmüş APK

Şekil 4. Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler

Kilin içeriğinde demir oksit ($\%Fe_2O_3$) oranının $\%7$ 'nin üzerinde olmasından dolayı rengi kırmızıdır ve ismini buradan almaktadır [19]. Kırmızı kil örneği ve APK katkısının XRF kimyasal analizleri Tablo 1'de verilmiştir. Kırmızı kil ve APK katkısının özgül ağırlık (G_s) değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Kil ve APK kimyasal içeriği

Bileşen	Kil (%)	APK Sırlı (%)
Al_2O_3	16,4	14,2
SiO_2	37	55,5
K_2O	6,3	6,81
CaO	4,8	6,14
TiO_2	4,3	3
Fe_2O_3	26	8,5
ZnO	1	1,7
ZrO_2	1,5	2,6
BaO	0,5	0,5
SrO	0,2	0,2
Rb_2O	0,2	0,2
MnO	0,3	0,3
P_2O_5	0,3	0,1
MgO	0,4	-

Tablo 2. Kil ve APK özgül ağırlık değerleri

Malzeme	Özgül ağırlık değerleri (G_s)
Kil	2,72
APK	2,60

B. Metot

APK katkısı $\%0$, $\%5$, $\%10$, $\%15$, $\%25$ olmak üzere değişen oranlarda kırmızı kil içerisinde kullanılarak kil zeminlerin mühendislik özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda tüm deney numuneleri ASTM (American Society for Testing and Materials) standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır.

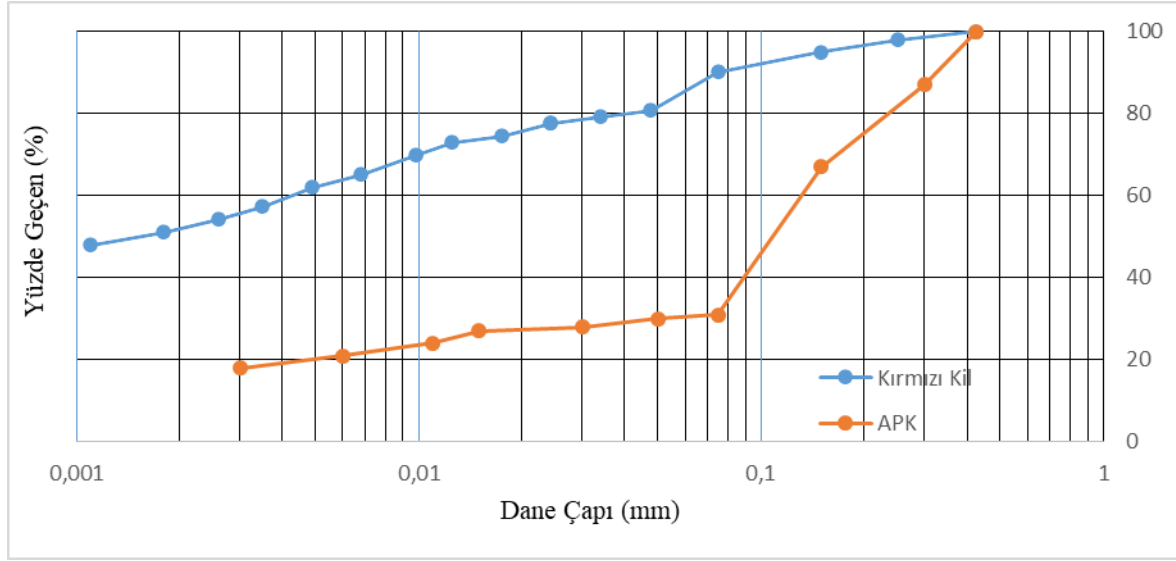
Çalışmada fiziksel, kimyasal ve mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Elek analizi ASTM D422-63 ve Hidrometre deneyi ASTM D422-07 standardına göre kil zemin ve APK boyutlandırmasını elde etmek için yapılmıştır [20,21]. ASTM D854 standardına göre, kırmızı kilin ve APK katkısının özgül ağırlık değerleri Piknometre yöntemiyle elde edilmiştir [22]. Kıvam limitleri deneyleri ASTM D4318 standardı ile APK katkılı kil karışımları üzerinde gerçekleştirilmiştir [23]. Maksimum sıkışma ve optimum su içeriği arasındaki ilişkiyi elde etmek amacıyla ASTM D698 standardına uygun olarak standart proktor deneyi yapılmıştır [24]. ASTM D2166 standardına uygun olarak tek eksenli serbest basınç deneyi yapılmış ve serbest basınç dayanımı ile deformasyon

ilişkileri tespit edilmiştir [25]. Konsolidasyon deneyi çalışmaları ASTM D2435-02 standardına uygun olarak gerçekleştirilerek APK oranının kil zeminin sıkışma ve şişme davranışı üzerine etkileri bulunmuştur [26]. Kalifornia Taşıma Oranı (CBR) deneyleri ASTM D1883-14 standardına uygun olarak yapılmıştır [27].

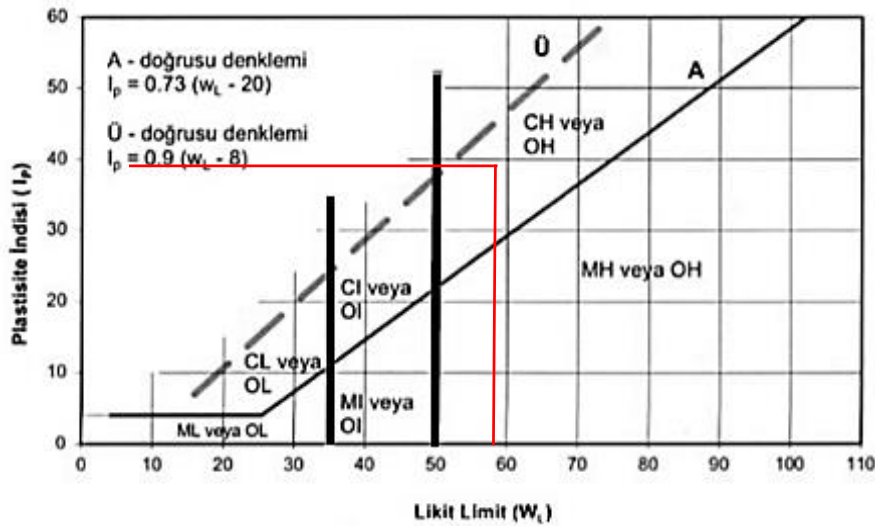
III. BULGULAR

A. Kırmızı Kil ve APK Boyut Özellikleri

Kırmızı kil ve APK üzerinde elek analizi ve hidrometre deney çalışmaları gerçekleştirilerek boyutlandırılma yapılmıştır (Şekil 5). TS1500-1 (2000) ve USCS zeminlerin sınıflandırılmasına göre kırmızı kil örneğinin zemin sınıfı CH (Yüksek Plastisiteli Kil) olarak bulunmuş ve Şekil 6'da gösterilmiştir [28].



Şekil 5. Kil ve APK dane dağılımı eğrisi

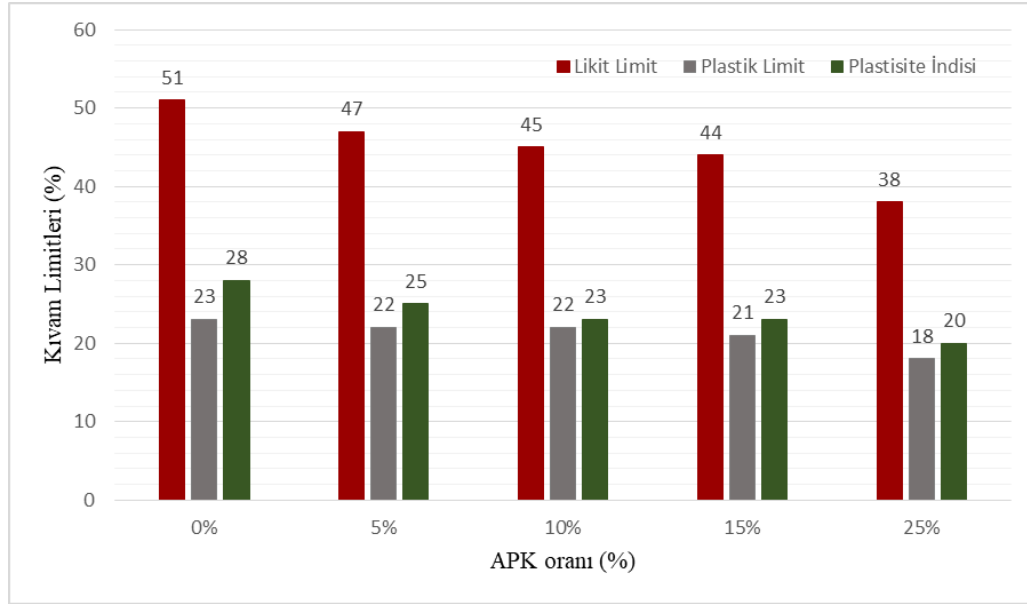


Şekil 6. Kilin sınıflandırılması

B. Kıvam Limitleri Deney Bulguları

Kıvam limitleri ince daneli zeminlerin sınıflandırılmasında kullanılan sayısal ifadelerdir ve aynı zamanda zemin davranışı hakkında birer işarettir [29]. Kırmızı kilin, Plastik limit (PL) ve Casagrande yöntemiyle belirlenmiş olan likit limit (LL) değerleri APK oranının (%) artmasıyla önemli bir azalış göstermiştir. Bu duruma bağlı olarak Plastisite İndisi (PI) değerinde de azalış olduğu görülmektedir (Şekil 7). Plastisite, kil zeminlerin en

önemli fiziksel özelliğidir [30]. APK oranındaki artışa bağlı olarak yüksek plastisiteli (CH) kırmızı kil, orta plastisiteli (CI) kile dönüşmüştür.

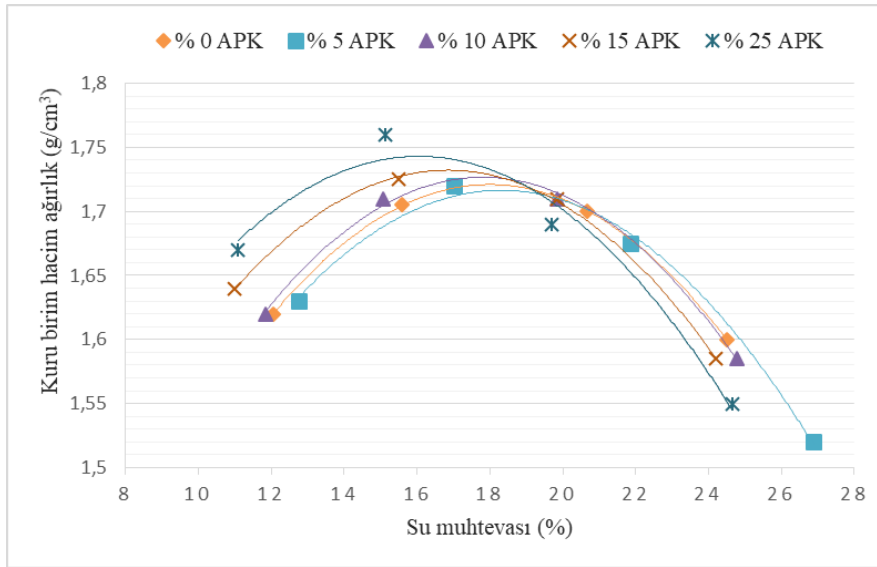


Şekil 7. Kıvam limitlerinin APK ile değişimi

Kıvam limitleri (likit limit, plastik limit) deney sonuçlarına göre APK oranının %25'e kadar artırılması ile likit limit değeri %25 civarında azalış göstermiştir. Plastik limit değeri ise %22 civarında azalmıştır. Plastisite indisi değeri de bu doğrultuda %28'den %20 değerine gerileyerek %30'a yakın bir azalma göstermiştir. Bu durum da kırmızı kil zeminin yüksek plastisite özelliğini azaltarak su karşısında daha kararlı bir davranış göstermesini sağlamaktadır.

C. Kompaksiyon (Standart Proktor) Deneyi Bulguları

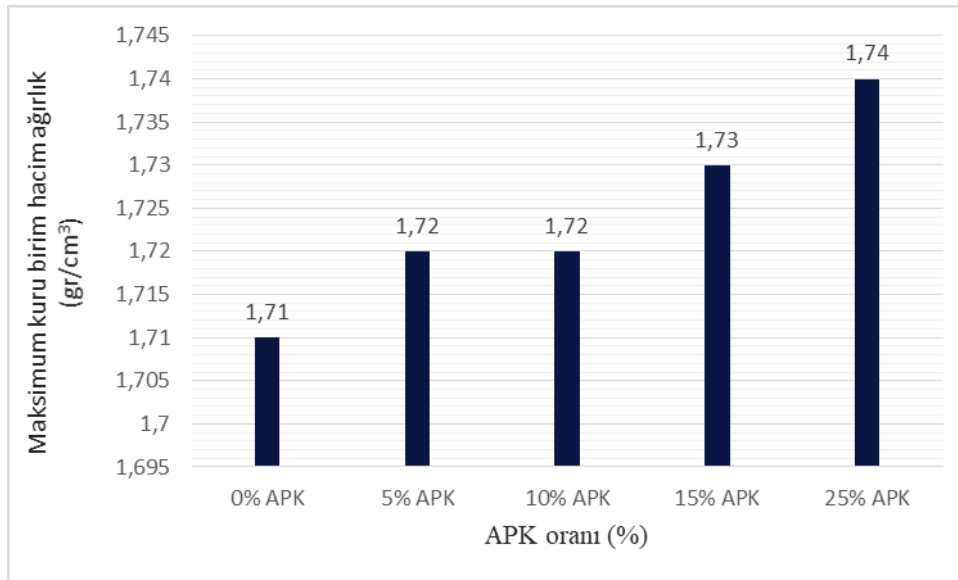
İnşaat mühendisliği uygulamalarında sahada karşılaşılan zeminlerin mühendislik parametreleri açısından istenilen özelliklerde olmadığı durumlarda (mukavemeti düşük, sıkışabilir özellikte yüksek hidrolik geçirgenlik vb.) sahadaki zemin tabakalarının stabilizasyonu uygun çözüm olabilmektedir [29]. Mekanik bir enerji ile zeminin sıkıştırılması işlemi olan kompaksiyon çalışmaları sayesinde zeminlerin mukavemetinin artması, hidrolik geçirgenliğinin azalması gibi faydalar sağlanabilir. Kırmızı kil zeminin APK katkısı ile kompaksiyon deneyleri karşısındaki davranışını belirlemek amacıyla standart proktor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çeşitli su içeriği yüzdelerinde su içeriği artırılarak numunelerin W_{opt} (optimum su içeriği değeri) ve ρ_{kmax} (maksimum kuru birim hacim ağırlık) ilişkisi elde edilmiştir. APK oranı artması ile W_{op} azalmış ve maksimum sıkışmayı gösteren ρ_{kmax} değeri yükselmiştir. %25 APK ile ρ_{kmax} 1,74 g/cm³ değerine ulaşmış ve W_{opt} %16,15 değerine gerilemiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Farklı APK oranlarındaki w_{opt} ile ρ_{kmax} grafiği değişimleri

APK oranı artmasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_k) artmıştır (Şekil 9).

Kompaksiyon (Standart Proktor) deneyi bulgularına göre kırmızı kilin içerisinde APK oranının artırılmasıyla birlikte optimum su muhtevası değerinde %15 oranında gerileme görülmektedir. Bununla birlikte maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri de artarak $1,71 \text{ g/cm}^3$ değerinden APK oranının %25'e ulaşmasıyla $1,74 \text{ g/cm}^3$ değerine yükseldiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu durumda zemin daha yoğun bir ortam olma özelliği kazanmıştır.

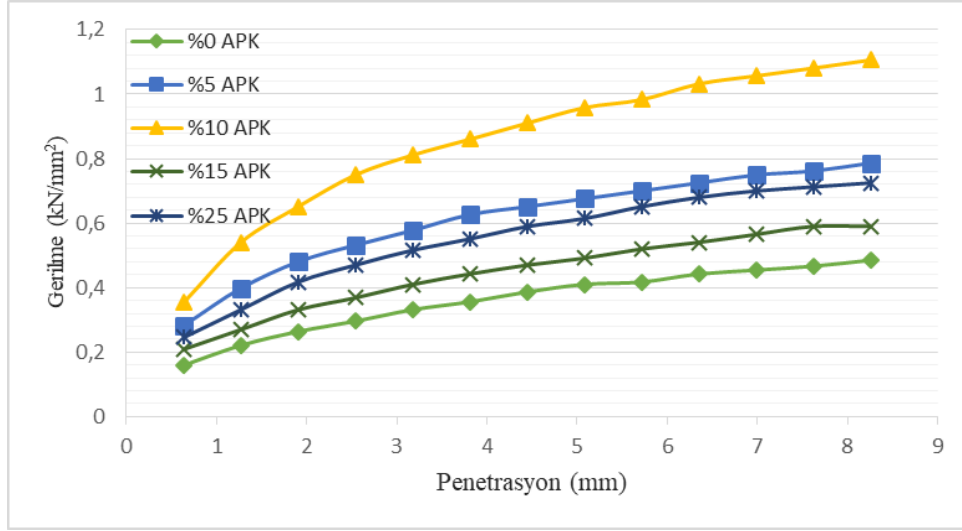


Şekil 9. APK ile maksimum kuru birim hacim ağırlık (ρ_{kmax}) ilişkisi

D. Kalifornia Taşıma Oranı (CBR) Deneyi Bulguları

Karayolları temel zeminlerinde CH killeri taşıma gücü yönünden problemlere sebep olabilmektedir. Bu tür koşullarda problem teşkil edebilecek killi zeminlerin stabilizasyonlarının kontrolünde CBR deneyi prosedürü uygulanmaktadır. Kırmızı kile (CH) %0, %5, %10, %15 ve %25 oranlarında APK eklenerek CBR deneyi karşısındaki davranışı incelenmiştir. Optimum su içeriğinde hazırlanan numuneler Şekil 10'da Kalifornia Taşıma Oranı (CBR) deneyine göre elde edilmiş olan gerilme ve deformasyon ilişkisi verilmiştir. Aynı penetrasyon

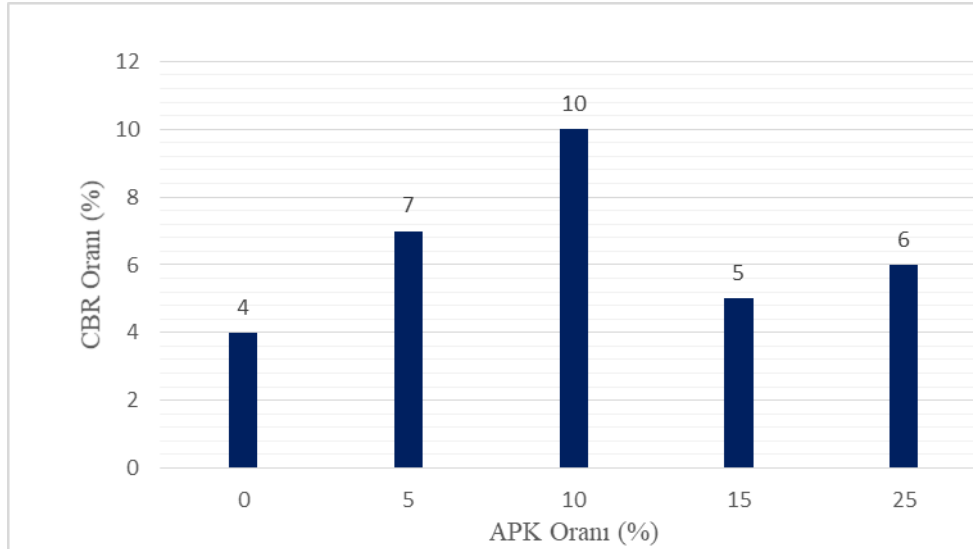
miktarları için en düşük gerilme değerinin %0 APK katkılı kilde olduğu görülmektedir. En büyük gerilme değeri tüm APK oranları arasında %10 APK oranı ile elde edilmiştir.



Şekil 10. Farklı APK oranlarının gerilme-penetrasyon ilişkisi üzerine etkisi

CBR oranının APK oranı ile değişimi Şekil 11’de görülmektedir. Buna göre katkısız kile oranla APK eklenmesi ile birlikte CBR oranı yükselmiştir. En yüksek değere %10 APK oranı ile ulaşılmıştır.

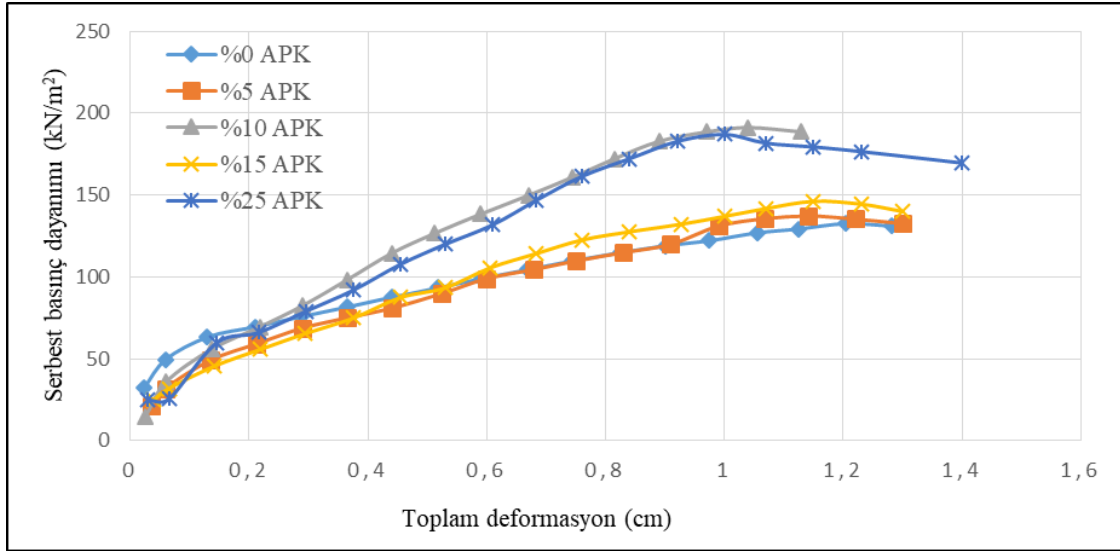
%10 APK ile aynı penetrasyon miktarlarında maksimum gerilme değerine ve CBR (%) oranına ulaşılmıştır. Bu durum karayolu altyapılarında kullanılan zeminlerin taşıma kapasitesini iyileştirdiği sonucuna ulaştırır. %10 APK’de maksimum değere ulaşılması ve sonrası tekrar azalma durumu kimyasal bir tepkime olmuş olabileceğine dikkat çekmektedir. Yapılan kimyasal analizler sonucunda elde edilen verilere dayanarak ve TS 25 ve ASTM C 618-19’a göre değerlendirildiğinde kil zeminin kimyasal içeriğinde $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ miktarının %79,4 oranında olması puzolanik özellik gösterme eğiliminde olabileceğini gösterir [31,32]. CaO miktarının %4,8 olması da çimentolaşma özelliği göstermesine az miktarda katkıda bulunacağını göstermektedir. APK kimyasal içeriğinde $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ miktarının %78,2 oranında olması puzolanik özelliğinin ortaya çıkmasının muhtemel olduğunu göstermektedir. Analizde APK’nin tek başına zeminde puzolanik (çimentolaşma) reaksiyonları başlatacak gerekli aktif CaO oranına ikincil düzeyde (%6.14) sahip olması nedeniyle reaksiyona belli seviyede etki gösterdiği sonucuna ulaşılmaktadır.



Şekil 11. California Taşıma Oranının APK ile değişimi

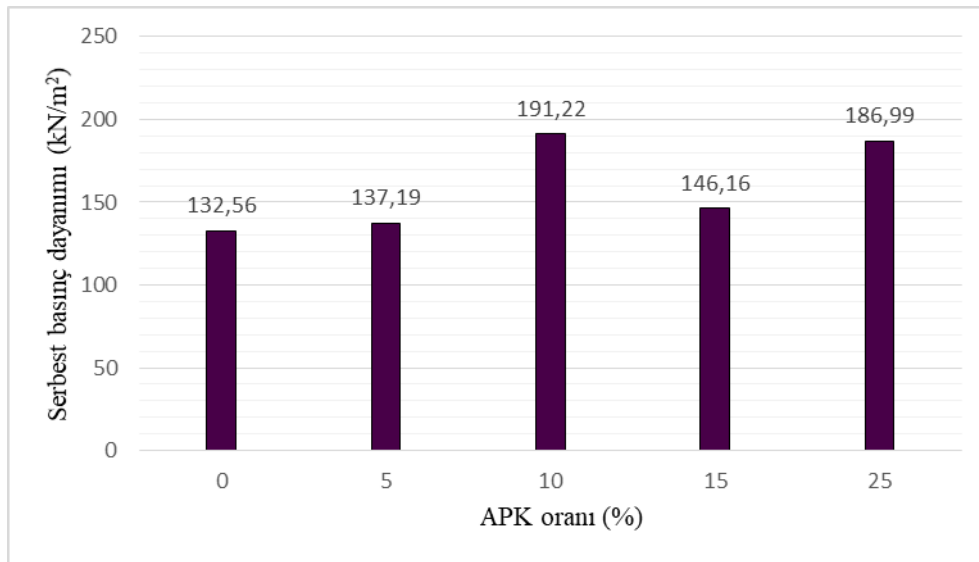
E. Tek Eksenli Drenajsız Serbest Basınç Deneyi Bulguları

Serbest basınç deneyi ile zeminlerin üzerlerine gelecek yükler karşısında gösterecekleri mukavemet değerleri belirlenir. APK katkısının CH kili mukavemeti üzerine etkisini incelemek amacıyla standart proktor deneyi ile optimum su içeriği oranında su eklenerek sıkıştırılmış ve bu sıkışmış zeminden elde edilmiş silindirik numuneler üzerinde serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Serbest basınç deneyi ile farklı APK oranlarına bağlı olarak serbest basınç dayanımı ve deformasyon ilişkisi elde edilmiştir (Şekil 12).



Şekil 12. Farklı APK oranlarında elde edilen serbest basınç dayanımı deformasyon ilişkileri

CBR deneyinde olduğu gibi %10 APK oranı ile maksimum değere ulaşılmış ve zeminin dayanımı %44 oranında artmıştır. Killi zeminlerde karşılaşılan en büyük problemlerden biri olan taşıma gücünün düşük olması APK kullanılmasıyla birlikte önemli oranda artmıştır.



Şekil 13. Farklı APK oranlarında serbest basınç dayanımı değişimi

F. Konsolidasyon Deneyi Bulguları

Çalışmada farklı APK oranlarında katkılar ile hazırlanan numuneler üzerinde tek boyutlu konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. APK katkılı numuneler standart proktor deneyi ile optimum su muhtevalarında sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Başlangıç boşluk oranı (e_0), sıkışma indisi (c_c), yeniden sıkışma indisi (c_r), konsolidasyon katsayısı (c_v), hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) ve geçirimsizlik katsayısı (k) değerlerinin APK oranı ile değişimleri bulunmuştur (Tablo 3).

Başlangıç boşluk oranı (e_0) ve APK oranı (%) arasındaki ilişki incelendiğinde katkısız kilin e_0 değeri APK eklenmesiyle azalmıştır. Bu durum su ihtiyacının giderek azalmasına ve kil danelerinin özgül ağırlık değerinin APK danelerinden daha yüksek olmasıyla açıklanabilir. Sıkışma indisi (c_c) değeri 200-400 kPa ve 400-800 kPa aralıklarında incelendiğinde APK oranının %25'lere ulaşması ile birlikte yaklaşık ortalama %30 civarına kadar azaldığı görülmüştür. Bu durum kil zeminin oturma davranışını kontrol altına almada önemli bir sonuç olmaktadır. Kil zemine %25 APK eklenmesiyle 100-400 kPa gerilme değişimi durumunda, yeniden sıkışma indisi (c_r) değerinin %42 oranında azaldığı ve buna bağlı olarak APK'nin kil zeminin şişme davranışının kontrol altına alınmasına olumlu yönde katkı sağladığı görülmüştür. Konsolidasyon katsayısı (c_v) değeri zeminlerin oturma/sıkışma hesaplarında önemli bir parametredir. Zeminin geçirimsizlik ve sıkışabilirliğine bağlı bir parametredir. Elde edilen bulgulara göre konsolidasyon katsayısı (c_v) değeri APK oranının artmasıyla 3 kata ulaşan artış göstermiştir. Hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) APK oranının artmasıyla %90 değerlerine ulaşan azalış göstermektedir. Geçirimsizlik katsayısı (k) APK oranının artmasıyla birlikte yaklaşık 50 kat artmıştır. Konsolidasyon deney sonuçlarına göre APK oranının artmasına bağlı olarak kil zeminin geçirimsizlik özelliği iyileşmekte ve oturma-şişme davranışı önemli ölçüde kontrol altına alınabilmektedir.

Tablo 3. APK oranının konsolidasyon deneyi sonuçlarına etkisi

APK Oranı (%)	Başlangıç boşluk oranı (e_0)	Sıkışma indisi (c_c)		Yeniden sıkışma indisi (c_r) 100-400 kPa	Konsolidasyon katsayısı (c_v)	Hacimsel sıkışma katsayısı (m_v)	Geçirimsizlik katsayısı k (cm/dk) 400 kPa
		200-400 kPa	400-800 kPa				
0	0,58	0,298	0,242	0,019	0,0035	0,0005	0,00000175
5	0,56	0,288	0,240	0,016	0,011	0,00049	0,00000539
10	0,55	0,219	0,208	0,015	0,015	0,00048	0,0000072
15	0,53	0,202	0,189	0,012	0,021	0,00046	0,0000096
25	0,49	0,186	0,177	0,011	0,0439	0,00036	0,000016

IV. SONUÇLAR

Kırmızı kil zemin, yüksek plastisiteli kil (CH) özelliği taşımaktadır. Bu tür zeminlerde karşılaşılabilecek problemler stabilite problemleri, şişme-oturma potansiyeli davranışı, düşük taşıma gücü ve kayma dayanımı özelliği şeklinde sıralanabilir. %0, %5, %10, %15 ve %25 oranında atık porselen karonun (APK) kil zemine ilave edilmesiyle CH kil zeminin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda APK katkısının CH kil zeminin kıvam limitleri değerini düşürerek plastisite özelliğini iyileştirdiği görülmüştür. Ayrıca kompaksiyon deneyi sonuçlarına göre daha az su içeriğinde daha yoğun bir zemin ortamı özelliği kazandırmıştır. CBR deneyi sonuçlarına göre ise karayollarında karşılaşılabilecek CH killerinde zeminin taşıma kapasitesini artırıcı yönde olumlu sonuçlar elde edilebileceği görülmüştür. Serbest basınç deneyi karşısında APK katkılı zeminin katkısız zemine göre daha yüksek basınç dayanımı davranışı gösterdiği elde edilmiştir. Konsolidasyon deneyi ile APK katkısı eklenmesiyle kil zeminin şişme oturma davranışının kontrol altına alınabileceği ve geçirimsizlik özelliğinin iyileştirilebileceği başarılı bir şekilde ortaya koyulmuştur.

Atık Porselen Karonun (APK) killi zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabileceği yapılan çalışmada gözlenmiştir. Geoteknik alanında teknik ve ekonomik çözümler sağlanması ve atıkların değerlendirilerek çevresel kirliliğin azaltılması amacıyla değerlendirilmesi sağlayacağı faydalar olarak sıralanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Çağlar, G. (2007). *Endüstriyel Atık Malzemelerin Karayollarında Kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] Girişken, M. (2010). *Gaziantep O.S.B. Atık Suyundan Kompostlaştırılarak elde Edilen Atık Madde ile Kil Karışımının Kesme ve Sıkıştırma Mukavemeti Parametreleri*. Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- [3] Çalık, Ü. (2012). *Perlitin Puzolanik Katkı Olarak Kireç İle Birlikte Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı*. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [4] Çabalar, A. (2016). Kırık Atık Seramik Karoları Kullanarak Killi Toprak Stabilizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- [5] Zorluer, İ., & Usta, M. (2003). Zeminlerin Atık Mermer Tozu İle İyileştirilmesi. *Türkiye IV. Mermer Sempozyumu (Mersem '2003) Bildiriler Kitabı*, Afyon, 18-19.
- [6] Çimen, Ö., Dereli, B., Coşan, F. Ş., Aydın, A., & Coşar, H. V. (2014). Dolguda Kullanılabilecek Bir Zeminin Mühendislik Özelliklerine Mermer Kırığı Atıklarının Etkisi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 30 (1), 48-52.
- [7] Zorluer, İ., & Gücek, S. (2016). Zemin İyileştirmede Endüstriyel Atıkların Dayanıma Etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2016 (16), 244-248.
- [8] Yadav, A., Gaurav, K., Kishor, R., & Suman, K. (2016). Stabilization of alluvial soil for subgrade using Rice Husk Ash, Sugarcane Bagasse Ash and Cow Dung Ash for rural Roads. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9 (1), 1-14.
- [9] Rahgozar, M., Sebarian, M., & Li, J. (2018). Soil Stabilization with Non-Conventional Eco-Friendly Agricultural Waste Materials: An Experimental Study. *Transportation Geotechnics*, 14 (March), 52-60.
- [10] Lall, E. (2016). Effect of Rice Husk Ash and Sugar Müll Waste as Admixture on Clay Soil. *Grenze Scientific Society, Proc. of International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology, IETET*. 161-166.
- [11] Ilieş, M., Circu, A., Nagy, A., Ciubotaru, V., & Bak, Z. (2017). Comparative Study on Soil Stabilization with Polyethylene Waste Materials and Binders. *10. International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG*, 444-451.
- [12] Sanchez, M., Castro, J., Urena, C., & Azanon, J. (2015). Stabilisation of Clayey and Marly Soils Using Industrial Wastes: Ph and Laser Granulometry Indicators. *Engineering Geology*, 200, 10-17.
- [13] Khalid, N., Mukri, M., Awang, H., Kamarudin, F., Ghani, A., & Hashim, S. (2016). Compaction Characteristics of Banting Soft Soil Subgrade Stabilized Using Waste Paper Sludge Ash (WPSA). *American Institute of Physics*, 1774, 030008: 1- 6.
- [14] Tülek, M., Okucu, A., & Değirmenci, N. (2014). Kimyasal Atık Alçıların Zemin Stabilizasyonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26 (2), 101-108.
- [15] Muntohar, A., Widiandi, A., Hartono, E., & Diana, W. (2013). Engineering Properties of Silty Soil Stabilized with Lime and Rice Husk Ash and Reinforced with Waste Plastic Fiber. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013 (25), 1260-1270.
- [16] Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2020). Seramik Sektörü Raporu, <https://www.sanayi.gov.tr/plan-program-raporlar-ve-yayinlar/sector-raporlari/mu2812011410>, (Erişim Tarihi: 01.02.2022).
- [17] Awoyera, P. O., Ndambuki, J. M., Akinmusuru, J. O., & Omole, D. O. (2018). Characterization of Ceramic Waste Aggregate Concrete. *Housing and Building National Research Center HBRC Journal*, 2018 (14), 282-287.
- [18] Poyraz, M., & Yılmaz, Z. (2018). Seramik Karo Sektöründe Sürdürülebilirlik ve Geri Dönüşüm. *Sanat ve Tasarım Dergisi*, 2018 (8), 256-270.
- [19] Serinsu, B. A., & Erden, B. C. (2018). Kınık ve Avanos Kırmızı Çömlek Killerinin Seramik Ham Sır Bileşiminde Yarattığı Değişikliklerin İncelenmesi. *İdil Dergisi*, 7 (48), 957-984.
- [20] ASTM D422-63 (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA.
- [21] ASTM D422-07. (2007). Standard Test Methods for Particle-Size Analysis of Soils. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA.
- [22] ASTM D854-02 (2014). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA.
- [23] ASTM D4318 (2008). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA.

- [24] ASTM D698-12e2 (2007). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA.
- [25] ASTM D2166M-13 (2013). Standard Test Methods for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA.
- [26] ASTM D2435M-11 (2011). Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA.
- [27] ASTM D1883-14 (2014). Standard Test Methods for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA.
- [28] TS 1500, 2000. İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması, TSE, Ankara, 25-57.
- [29] SheahanT. C. , KovacsW. D., & HoltzR. D. (2015). Geoteknik Mühendisliğine Giriş. Nobel Akademik Yayıncılık, Türkiye, 864.
- [30] Casagrande (1932).Research on the Atterberg Limits of Soils” Public Roads, vol. 13, no.8, pp. 121-136.
- [31] TS 25, 2008. Doğal puzolan (tras)-Çimento ve betonda kullanılan Tarifler, Gereklere ve Uygunluk Kriterleri, TSE, Ankara.
- [32] ASTM C618-19 (2019). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use in Concrete. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA.