



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 20.05.2022
Kabul Tarihi : 06.08.2022

Received Date : 20.05.2022
Accepted Date : 06.08.2022

STABİLİZASYONDA KİREÇ VE TÜFLERİN BİRLİKTE KULLANIMININ BENTONİT DAYANIMINA ETKİSİ

THE EFFECT OF USING LIME AND TUFF TOGETHER IN STABILIZATION ON THE STRENGTH ON BENTONITE

Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU¹ (ORCID: 0000-0002-3135-5926)

¹ Fırat Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU, yaslan@firat.edu.tr

ÖZET

Puzolanik özelliğe sahip katkı malzemeleri kullanılarak killi zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi olarak tanımlanan stabilizasyon, kolay uygulanabilir ve ekonomik bir yöntem olması nedeniyle günümüzde çok fazla tercih edilmektedir. Bu çalışmada, katkı malzemesi olarak farklı özellikteki tüfler ile birlikte sönmüş kireç kullanımının bentonitin serbest basınç ve drenajsız kayma dayanımına olan etkileri incelenmiştir. Bu amaçla farklı oranlarda sönmüş kireç ile asidik ve bazik karakterli tüflerin katkı malzemesi olarak kullanıldığı örnekler hazırlanmış ve bu örnekler optimum su içeriği değerinde Standard proktor ile sıkıştırılmıştır. Optimum su içeriği değerinde hazırlanan örneklerde hem kür öncesi, hem de 28 günlük kür sonrasında serbest basınç ve konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda kür sonrasında tüm örneklerin serbest basınç dayanımı (q_u) ve kohezyon (c) değerleri önemli oranda artış göstermekle birlikte %5 KRÇ ve %10 KRÇ katkılı örneklerde en büyük q_u ve c değerleri belirlenmiştir. Kür sonrasında katkısız kilin q_u değeri 249.10 kN/m^2 iken, %5 KRÇ katkısıyla 437.39 kN/m^2 , %10 KRÇ katkısıyla ise 712.97 kN/m^2 olarak belirlenmiştir. Kür sonrasında kilin c değeri 110.82 kN/m^2 iken %5 KRÇ katkısıyla 225.59 kN/m^2 , %10 KRÇ katkısıyla ise 380.51 kN/m^2 olduğu bulunmuştur. Ancak tuf katkılarının kullanılmasıyla birlikte serbest basınç dayanımı q_u ve c değerlerinin bir miktar azaldığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: dayanım, kil, kompaksiyon, stabilizasyon, tuf

ABSTRACT

Stabilization, which is defined as the improvement of the geotechnical properties of clayey soils by using additives with pozzolanic properties, is highly preferred today because it is an easily applicable and economical method. In this study, the effects of using slaked lime together with tuffs of different properties on unconfined compressive and the undrained shear strength of bentonite were investigated. For this purpose, samples in which lime and acidic and basic tuffs in different proportions were used as additives were prepared and these samples were compressed with Standard Proctor at optimum water content. Unconfined compressive and unconsolidated-undrained (UU) triaxial compressive strength tests were performed on the samples prepared at optimum water content both before curing and after 28 days of curing. As a result of the experimental studies, although the unconfined compressive strength (q_u) and cohesion (c) values of all samples increased significantly after curing, the highest q_u and c values were determined in the samples with 5% KRC and 10% KRC. q_u value of the pure clay after curing was 249.10 kN/m^2 , while it was determined as 437.39 kN/m^2 with 5% KRC additive and 712.97 kN/m^2 with 10% KRC additive. While the c value of the clay after curing was 110.82 kN/m^2 , it was found to be 225.59 kN/m^2 with 5% KRC and 380.51 kN/m^2 with 10% KRC. However, with the use of tuff additives, it was determined that the q_u and c values slightly decreased.

Keywords: strength, clay, compaction, stabilization, tuff

GİRİŞ

Zeminler her zaman istenilen özelliklere sahip olmayabilir ve böyle durumlarda inşaat yeri değiştirilebilir, istenilen özelliklere sahip olmayan zemin kaldırılarak uygun zemin yerleştirilebilir fakat bu çözümler çoğunlukla ekonomik değildir. Zemine katkı maddeleri eklenerek yapılan stabilizasyon kolay uygulanabilmesi ve ekonomik olmasından dolayı çok fazla tercih edilmektedir. Killerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesinde yaygın olarak kullanılan stabilizasyon, mühendislik ihtiyaçlarını karşılamak için geoteknik özelliklerin değiştirilmesi işlemidir (Attoh-Okine, 1995). Zemin stabilizasyonu amacıyla çimento, uçucu kül, kireç, silis dumanı, tuf, şeyl, volkanik cam, diatomit ve volkanik kül gibi katkı maddeleri zemine ait elementlerle kimyasal reaksiyona girerek iyileştirirken (Asgari et al., 2015; Goodarzi et al., 2015; Voottipruex and Jamsawang, 2014; Lin et al., 2013; Mahamedi and Khemissa, 2013; Wang et al., 2013; Azadegan et al., 2012; Cuisinier et al., 2011; Harichane et al., 2011; Hossain and Mol, 2011; Ramadas et al., 2011; Aksoy vd., 2008; Al-Rawas et al., 2005; Mallela et al., 2004; Kalkan ve Akbulut, 2004; Puppala et al., 2003; Boardman et al., 2001; Little, 1995), diğer katkı malzemelerinden olan jeofiber ve jeogrid ise fiziksel etkileri ile zemin özelliklerinde iyileşme sağlamaktadır (Chong and Kassim, 2014; Yang et al., 2012). Bu katkı malzemeleri puzolan olarak tanımlanmaktadır ve puzolan, ASTM C 618 (2012)'ye göre kendi kendine bağlayıcılık özelliği çok az olan ya da hiç olmayan, fakat uygun nem şartlarında ve normal ortam sıcaklığında kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğe sahip ürünler ortaya çıkararak, ince toz halindeki silisli veya silisli ve alüminli maddelerdir. Doğal ve yapay puzolanlar olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Doğal puzolanlar başlangıcından sonra değişikliğe uğramış volkanik kökenli veya sedimanter kayalardan oluşur ve kökeni çoğunlukla volkanik camlar, tüfler ve volkanik kül gibi piroklastik kayalardır. Killer, şeyller ve diatomitler ise ısı işlem görmüş doğal puzolanlardır. Yapay puzolanlar ise silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürünlerdir (Ün, 2007). Bu katkı malzemelerinin en önemli özelliği puzolanik reaksiyon oluşturmalarıdır. Katkı malzemeleri öncelikle zeminin su içeriğinin azalmasına ve daha kolay işlenebilir hale gelmesini sağlarken uzun vadede ise zeminin dayanım, sıkışabilirlik ve duraylılık özelliklerini iyileştirmektedir (Geiman, 2005; Mallela et al., 2004; Wild et al., 1996; Locat et al. 1990). Stabilizasyonla zemin dokusu, zemini oluşturan danelerin büyük boyutlu kümeler oluşturmasıyla değişmektedir. Zeminin boşluk oranı ve optimum su içeriğinin artmasını, maksimum kuru yoğunluğunun ise azalmasını sağlayan bu olay topaklanma olarak tanımlanmaktadır (Kinuthia et al., 1999). Bu katkı malzemelerinden kireç katkı olarak killi bir zemine eklendiği zaman, katyon değişimi ve flokülasyon gibi kimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir ve bu reaksiyonların bütünü puzolanik reaksiyonlar olarak tanımlanmaktadır. Katyon değişimi ve flokülasyon-aglomerasyon sonucu kısa vadeli, puzolanik reaksiyonlar sonucu ise uzun vadeli iyileşmeler oluşmaktadır (Özaydın, 2012).

Stabilizasyonda kullanılacak katkı malzemesinin doğada bol miktarda bulunması, ekonomik ve çevre dostu olması oldukça önemlidir. Pomza, perlit ve tuf gibi malzemelerin zemin iyileştirmede kullanılabilirliği (Çelik 2020; Çimen vd. 2020; Çimen ve Coşan 2019; Yılmaz 2017; Calik and Sadoglu 2014; Bulut ve Tanaçan 2009; Kavlak, 2008; Bulut, 2007; Fındık, 2005; Okucu, 1998; Keskin ve Çimen, 1997) tarafından araştırılmıştır. Çelik (2020) zemin stabilizasyonunda pomza taşının incelik etkisinin incelenmesi başlıklı çalışmasında inceltilmiş pomza taşı kullanılmasının hazırlanan numunelerin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Deneyler sonucunda, kıvam limitleri ve kompaksiyon parametreleri üzerinde, pomza taşının inceltilmesinin etkisinin sınırlı düzeyde olduğunu tespit etmiştir. Araştırmacı kireçsiz örneklerin dayanımlarında, inceltilmiş pomza taşının katkı maddesi olarak kullanılmasının, kireçli örneklerin dayanım ve durabilitelelerinde ham pomza kullanımına göre daha fazla iyileştirme sağladığını belirlemiştir. Doğal zemine göre, sadece kireç eklenerek hazırlanan örneğin likit limit ve plastisite indisi değerlerinde azalma, plastik limit değerinde ise artış meydana geldiğini tespit etmiştir. Çimen vd. (2020) üç farklı bölgeye ait pomzanın yüksek plastisiteli kile etkisinin karşılaştırmasını yaptığı çalışmada pomza türü ve oranının kilin likit limit, plastik limit, plastisite indisi, optimum su içeriği, maksimum kuru birim hacim ağırlığı, şişme basıncı ve serbest basınç dayanımında meydana gelen değişimleri incelemiştir. Çalışmacılar pomza-kil-kireç üçlü karışımlarında pomza oranının artması ile likit limit, plastisite indisi, optimum su muhtevası ve şişme basıncının azaldığını, plastik limit ve serbest basınç direncinin ise arttığını belirlemişlerdir. Çimen ve Coşan (2019) yüksek plastisiteli kile, ağırlıkça belirli oranlarda volkanik tuf ve amorf silika karıştırdıkları çalışmada karışımların mühendislik özelliklerinin değişimi incelemiştir. Çalışmacılar daha sonra kile %5 oranında kireç katarak volkanik tuf ve amorf silika katkılı deneyleri tekrarlamış ve kıvam limitleri, standart kompaksiyon, serbest basınç ve sabit hacimli şişme basıncı deneyleri yapmıştır. Deneylere göre volkanik tuf katkısının kilin serbest basınç mukavemetini bir miktar arttırdığı, şişme basıncının önce azaldığı, daha sonra arttığı, kireç ve volkanik tuf katkılı deneylerde ise serbest basınç mukavemetinin daha fazla arttığı, şişme basıncının daha fazla azaldığı belirlenmiştir. Kireç ve amorf silika katkılı deneylerde ise şişme basıncının daha fazla azaldığı ve serbest basınç mukavemetinin daha fazla arttığı ifade edilmiştir. Serbest basınç mukavemetinin artmasında aynı orandaki amorf silika katkısı daha etkili olurken,

şişme basıncının azalmasında ise volkanik tuf daha etkili olmuştur. Yılmaz (2017) Bu çalışması kapsamında puzolanik katkı olarak killi bir zeminin stabilizasyonunda tek başına çimentolaşma kabiliyeti yetersiz olan perlitin, kullanılabilirliğini incelemiştir. Yüksek CaO içeriğinden dolayı bağlayıcı olarak kireci seçen çalışmacı zemin, %6 kireç ve oranlarında farklı oranlarda (%0, %5, %10, %15, %20, %25, %30) perlit karıştırmıştır. Puzolanik katkı olarak kullanılan perlit doğal ve ince öğütülmüş şekilde stabilizasyonda kullanılmış, karışımların indeks ve dayanım özelliklerini incelenmiştir. Perlitin inceltilmesiyle daha düşük perlit oranlarında daha yüksek mukavemet değerlerinin meydana geldiğinin belirlendiği çalışmada, puzolanik katkı olan perlitin inceltilmesinin dayanım değerlerini doğrudan etkilediği tespit edilmiştir. Calik ve Sadoglu (2014) tarafından yapılan çalışmada montmorillonit ve nontronit gibi simektit grubu kil mineralleri içeren killi bir zeminin perlit ve kireç ile stabilizasyonu deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada %8 kireçli (zeminin optimum kireç oranı) ve kirecsiz olarak %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 perlit eklenerek deney karışımları hazırlanmış ve karışımların kompaksiyon, Atterberg limitleri, şişme, serbest basınç dayanımları gibi geoteknik özellikleri ve bu özelliklerin perlit oranına ve zamana bağlı olarak değişimleri belirlenmiştir. Deney sonuçları, zeminin perlit ve kireç kombinasyonu ile stabilizasyonunun, geoteknik özellikleri tek başına perlit veya kireçten daha iyi geliştirdiğini göstermiştir. Bulut Karaca ve Tanaçan (2009) tarafından perlitin puzolanik özeliğinden yararlanılarak kullanılması, olanaklarının araştırılması ve kullanımının yaygınlaştırılmasının amaçlandığı çalışmada perlitin puzolanik aktivitesine etki eden parametrelerin belirlenmesi ve bu parametrelerin, aktiviteyi artırıcı yönde geliştirilmesi olanakları, deneysel yöntemler ile araştırılmıştır. Araştırma sonucunda perlitin puzolanik aktivite gösterdiği kanıtlanmış, perlitli kireç harcının aktivite gelişimini etkileyen faktörler belirlenmiş ve perlitin puzolan malzeme olarak geliştirilebilme potansiyeli olduğu saptanmıştır. Stabilizasyon konusunda yapılan çalışmalarda katkı malzemelerinin zeminin kıvam limitlerinde, dayanım ve duraylılığında, sıkışabilirlik, şişme potansiyeli, şişme basıncı ve hacimsel değişim özelliklerinin iyileştirilmesinde etkili olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışma ile farklı oranlarda sönmüş kireç ve asidik-bazik tuf katkılarının birlikte kullanılarak stabilizasyondaki etkilerinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Tek katkı malzemesi ve iki katkı malzemesinin beraber kullanılmasının kilin serbest basınç ve kayma dayanımındaki değişimin belirlenmesi ve ayrıca kilin stabilizasyonunda doğada bol olarak bulunan doğal ve çevreci olan tuf katkılarının kullanılabilirliğinin belirlenmesi ülke ekonomisi açısından da önem taşımaktadır. Yapılan laboratuvar deneyleriyle stabilizasyonda en fazla etkiyi gösteren karışım tipi ve oranının tespit edilmesi ve iki farklı özellikteki tufün etkinliğinin ortaya konması hedeflenmiştir.

MATERYAL VE METOT

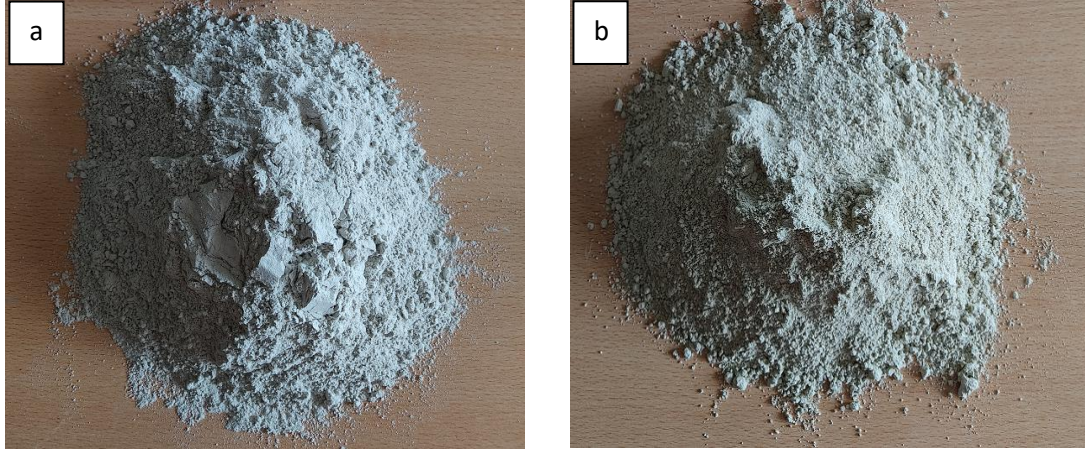
Bentonit ve Katkı Malzemelerinin Özellikleri

Deneysel çalışmalarda, Tokat-Reşadiye (Türkiye) kil ocağında üretilen katkısız bentonit kullanılmıştır (Şekil 1). Alüminyum ve magnezyum içeriği bakımından zengin volkanik kül, lav ve tüflerin kimyasal ayrışması ya da bozulması sonucunda meydana gelen, montmorillonit ailesine bağlı bir kil minerali olan bentonit kili, (Önem, 2000; Akbulut, 1996) kimyasal olarak hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan oluşmaktadır. Su ile etkileşime geçtiğinde şişerek hacimleri artan, iyonlaşma kapasitesi yüksek olan bentonitin dane boyu 2 µm (0.002 mm) veya daha küçüktür ve plastisitesi yüksektir. Kolloidal özelliğe sahip, yoğunluğu yaklaşık 2.6 gr/cm³ olan bir kil türüdür. (Genç, 2009). XRF analiz sonuçlarına göre bu çalışmada kullanılan kilin Na-bentonit olduğu belirlenmiştir (Aslan Topçuoğlu, 2020). Katkı malzemesi olarak kullanılan asidik karakterli tuf Gümüşhane ili ve civarında yüzlek veren Kızılkaya Formasyon'undan (Şekil 2a), bazik karakterli tüfler ise Elazığ ili Ağın bölgesinde yüzleme veren Karabakır Formasyon'undan (Şekil 2b) alınmıştır. XRF analizi sonuçlarına göre SiO₂ miktarı %63'den fazla olan ve Kızılkaya Formasyonundan alınan tüflerin asidik karakterli olduğu, kimyasal olarak SiO₂ miktarı %45'den az olan ve Karabakır Formasyonu'na ait tüflerin ise bazik karakterli olduğu tespit edilmiştir (Aslan Topçuoğlu, 2020).



Şekil 1. Çalışmada Kullanılan Bentonit Kili

TS 25'e (2008) göre traslarda aranılan kimyasal özelliklerde $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ en az %70, MgO en çok %5, SO_3 en çok %3, rutubet en çok %10 olmalıdır. Bu çalışmada kullanılan asidik tüfün $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %90.27, MgO %0.19, SO_3 %0.90'dır ve bu değerler çalışmada kullanılan asidik karakterli tüfün TS 25 (2008)'e göre tras olarak kullanılabilme özelliğinin olduğunu göstermektedir. Ancak bazik tüf TS 25'e (2008) göre değerlendirildiğinde $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarının %42.04, MgO miktarının %2.11, SO_3 miktarının ise %0.036 olmasından dolayı tras olarak kullanılabilme şartlarını sağlamadığı görülmektedir.



Şekil 2. a. Çalışmada Kullanılan Asidik Tüf b. Bazik Tüf

Çalışmada kullanılan sönmüş kireç ise kimyasal malzeme satan firmalardan temin edilmiştir (Şekil 3). Mineralojik analizde asidik tüfün tek başına zeminde puzolanik (çimentolaşma) reaksiyonları başlatacak gerekli aktif CaO oranına sahip olmaması (yaklaşık %0.76) nedeniyle sönmüş kireç gibi %70.10 aktif CaO içeren bir bağlayıcı ile eksik olan bu etken maddenin tamamlanması düşünülmüştür. Bazik tüf ise %28.70 oranında CaO içermektedir. Bundan dolayı tek ve iki katkı malzemesinin kullanıldığı karışımlar hazırlanarak mühendislik özellikleri belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan bentonit kili (K), sönmüş kireç (KRÇ), asidik tüf (AT), bazik tüf (BT) sembolleriyle gösterilmiş olup, bentonit ve katkı malzemelerinin kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 3. Çalışmada Kullanılan Sönmüş Kireç

Tablo 1. Bentonit ve Katkı Malzemelerinin Kimyasal Özellikleri (Aslan Topçuoğlu, 2020).

| Ana Oksit (%) | K | KRÇ | AT | BT |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| SiO ₂ | 62.50 | 1.55 | 69,10 | 31.40 |
| Al ₂ O ₃ | 17.60 | 0.44 | 20.70 | 7.15 |
| Fe ₂ O ₃ | 3.63 | 0.14 | 0.47 | 3.49 |
| MgO | 2.00 | 0.57 | 0.19 | 2.11 |
| CaO | 2.86 | 70.10 | 0.76 | 28.70 |
| Na ₂ O | 2.58 | 0.26 | 0.39 | 0.60 |
| K ₂ O | 0.92 | 0.07 | 1.43 | 0.87 |
| TiO ₂ | 0.32 | 0.04 | 0.29 | 0.41 |
| MnO | 0.10 | 0.05 | <0.01 | 0.03 |
| P ₂ O ₅ | 0.14 | 0.04 | 0.06 | 0.09 |
| SO ₃ | 0.076 | 1.39 | 0.90 | 0.036 |
| Cr ₂ O ₃ | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 0.02 |
| Sr | 0.073 | 0.015 | 0.024 | 0.033 |
| Kızdırma Kaybı | 6.60 | 26.40 | 5.50 | 24.80 |

Laboratuvar Çalışmaları

Bu çalışma kapsamındaki laboratuvar çalışmalarında, örnek hazırlama, katkısız kilin ve katkılı örneklerin standart proktor, serbest basınç ve üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar Fırat Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kaya-Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

Örnek Hazırlama

Asidik ve bazik karakterli tüfler Gümüşhane ve Elazığ bölgesinde yapılan arazi çalışması ile derlenmiş ve laboratuvara getirilen tüf blokları öğütülerek 200 nolu elekten elenmiştir. Öncelikle kil etüvde 24 saat 105°C'de kurutulduktan sonra kile farklı oranlarda sönmüş kireç, asidik tüf ve bazik tüf katkıları eklenmiş iyice karıştırılmış ve katkılı kil karışımlarının üzerine distile su eşit olarak püskürtülmüş el ile tekrar karıştırılmıştır. Karıştırma işleminin süresi zemin ve katkı malzemelerinin homojenliğini sağlamak amacıyla 5 dakika olarak seçilmiştir. Hazırlanan silindirik örneklerin yarısında deneyler hemen gerçekleştirilmiş, diğer yarısı ise selofan ile sarılarak nemini kaybetmemesi için desikatör içinde 28 günlük kürde bekletilmiştir. Kullanılan karışımlara ait katkı oranları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Karışımlara Ait katkı Oranları

| Örnek | K (%) | AT (%) | BT (%) | KRÇ (%) |
|------------------------|-------|--------|--------|---------|
| K | 100 | | | |
| K + % 5 AT | 95 | 5 | | |
| K + % 5 BT | 95 | | 5 | |
| K + % 10 AT | 90 | 10 | | |
| K + % 10 BT | 90 | | 10 | |
| K + % 5 KRÇ | 95 | | | 5 |
| K + % 10 KRÇ | 90 | | | 10 |
| K + % 5 AT + % 5 KRÇ | 90 | 5 | | 5 |
| K + % 5 BT + % 5 KRÇ | 90 | | 5 | 5 |
| K + % 10 AT + % 5 KRÇ | 85 | 10 | | 5 |
| K + % 10 BT + % 5 KRÇ | 85 | | 10 | 5 |
| K + % 5 AT + % 10 KRÇ | 85 | 5 | | 10 |
| K + % 5 BT + % 10 KRÇ | 85 | | 5 | 10 |
| K + % 10 AT + % 10 KRÇ | 80 | 10 | | 10 |
| K + % 10 BT + % 10 KRÇ | 80 | | 10 | 10 |

K: Kil, KRÇ: Sönmüş Kireç, AT: Asidik Tüf, BT Bazik Tüf

Standard Proktor Deneyi

Deneysel çalışmaların ilk aşamasında kile kuru ağırlıkça %5 AT, %5 BT, %10 AT, %10 BT, %5 KRÇ, %10 KRÇ, %5 AT + %5 KRÇ, %5 BT + %5 KRÇ, %10 AT + %5 KRÇ, %10 BT + %5 KRÇ, %5 AT + %10 KRÇ, %5 BT + %10 KRÇ, %10 AT + %10 KRÇ, %10 BT + %10 KRÇ katkıları eklenerek hazırlanmış olan katkılı örneklerde ASTM D 698 (2012) standardına göre standart proktor deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). Maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) ve optimum su içeriği (w_{opt}) parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılan bu deney, 30.5 cm

yükseklikten serbest düşmeye bırakılan 2.5 kg'lık yük altında zeminin üç tabaka halinde kalıp (mold) içerisine sıkıştırılması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Bu çalışma ile belirlenen Standard proktor deneylerine ait sonuçlar Tablo 3'de verilmiştir.



Şekil 4. a. Standard Proktor Deneyinin Yapılışı **b.** Proktor Kalıbında Sıkıştırılmış Örnek

Katkısız kilin w_{opt} değeri %38.50, γ_{kmax} değeri ise 12.36 kN/m^3 olarak bulunmuştur. En büyük w_{opt} değeri %10 AT + %10 KRÇ, en küçük w_{opt} değeri ise %10 AT katkılı karışımda tespit edilmiştir. Ayrıca en büyük γ_{kmax} değeri %5 BT, en küçük γ_{kmax} değeri ise %10 AT + %10 KRÇ katkılı örnekte belirlenmiştir.

Tüflerin özgül ağırlığının kilin özgül ağırlığından daha küçük olması nedeniyle karışımların γ_{kmax} değerlerinde azalma meydana gelmiştir. %10 KRÇ katkılı karışımlarının w_{opt} değerleri %5 KRÇ katkılı karışımlara göre daha fazladır. Ayrıca %10 KRÇ katkılı karışımlarının γ_{kmax} değerlerinin %5 KRÇ katkılı karışımların γ_{kmax} değerlerinden daha küçük olduğu belirlenmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Standart Proktor Deneylerine Ait Sonuçlar

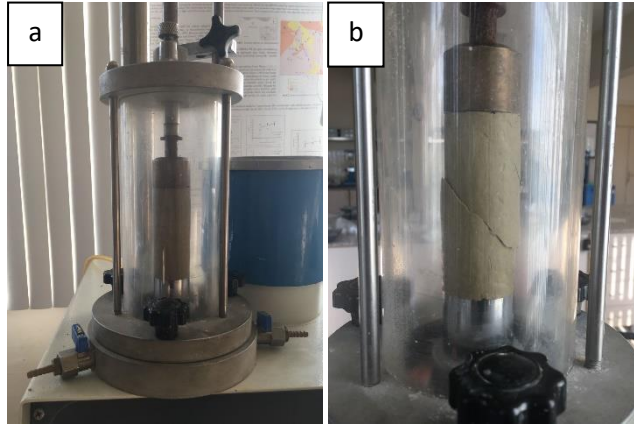
| Örnek | w_{opt} (%) | γ_{kmax} (kN/m^3) |
|----------------------|------------------|--|
| K | 38.50 | 12.36 |
| K + %5 AT | 48.00 | 10.77 |
| K + %5 BT | 40.00 | 10.98 |
| K + %10 AT | 39.00 | 10.65 |
| K + %10 BT | 46.10 | 10.60 |
| K + %5 KRÇ | 40.91 | 10.49 |
| K + %10 KRÇ | 43.00 | 10.30 |
| K + %5 AT + %5 KRÇ | 54.00 | 9.91 |
| K + %5 BT + %5 KRÇ | 50.00 | 9.71 |
| K + %10 AT + %5 KRÇ | 55.51 | 9.81 |
| K + %10 BT + %5 KRÇ | 51.00 | 9.75 |
| K + %5 AT + %10 KRÇ | 65.00 | 8.83 |
| K + %5 BT + %10 KRÇ | 56.00 | 9.61 |
| K + %10 AT + %10 KRÇ | 70.00 | 8.53 |
| K + %10 BT + %10 KRÇ | 57.00 | 9.51 |

K: Kil, KRÇ: Sönmüş Kireç, AT: Asidik Tüf, BT Bazik Tüf

Serbest Basınç Deneyi

Katkısız kil ve katkılı örnekler optimum su içeriğinde sıkıştırıldıktan sonra serbest basınç dayanımları (q_u) ASTM D2166M-16 (2016) standardına göre gerçekleştirilen serbest basınç deneyleri ile belirlenmiştir. Deneyde boy uzunluğu çapının iki katı olacak şekilde silindirik örnekler hazırlanmış ve hem kür öncesinde hem de 28 günlük kür sonrasında deneyler yapılmıştır (Şekil 5).

Deney sonuçlarına göre katkısız kilin kür öncesi q_u değeri 206.93 kN/m^2 , kür sonrası q_u değeri ise 249.10 kN/m^2 olarak bulunmuştur. Katkılı örneklerin kür öncesi q_u değerleri $115.30\text{-}280.48 \text{ kN/m}^2$ arasında, kür sonrası ise q_u değerleri ise $162.10\text{-}712.97 \text{ kN/m}^2$ arasında değişmektedir (Tablo 4).



Şekil 5. a. Serbest Basınç Deneyi Öncesi Örnek b. Deney Sonrası Örnek

Tablo 4. Serbest Basınç Dayanımı Deneylerine Ait Sonuçlar

| Örnek | q_u (kN/m ²) | |
|----------------------|----------------------------|---------------|
| | Kürsüz | 28 günlük kür |
| K | 206.93 | 249.10 |
| K + %5 AT | 120.25 | 185.20 |
| K + %5 BT | 115.30 | 162.10 |
| K + %10 AT | 129.15 | 192.23 |
| K + %10 BT | 120.13 | 170.11 |
| K + %5 KRÇ | 200.06 | 437.39 |
| K + %10 KRÇ | 280.48 | 712.97 |
| K + %5 AT + %5 KRÇ | 149.07 | 306.96 |
| K + %5 BT + %5 KRÇ | 146,12 | 288.33 |
| K + %10 AT + %5 KRÇ | 155.65 | 314.11 |
| K + %10 BT + %5 KRÇ | 150.20 | 304.80 |
| K + %5 AT + %10 KRÇ | 220.58 | 615.88 |
| K + %5 BT + %10 KRÇ | 213.24 | 594.30 |
| K + %10 AT + %10 KRÇ | 240.25 | 627.12 |
| K + %10 BT + %10 KRÇ | 235.00 | 610.59 |

K: Kil, KRÇ: Sönmüş Kireç, AT: Asidik Tüf, BT: Bazik Tüf

Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi

Katkısız ve katkılı kil örnekleri optimum su içeriğinde sıkıştırılarak örneklerin kohezyon (c) değerini belirlemek için ASTM D2850-15 (2015) standardına göre UU tipi üç eksenli basınç deneyi boyu çapının iki katı olan örneklerde gerçekleştirilmiştir (Şekil 6). Deneyler 28 günlük kür sonrasında tekrar yapılmıştır.

Üç eksenli sıkışma deneyi sonuçlarına göre katkısız kilin kür öncesi c değeri 98.07 kN/m², kür sonrası c değeri ise 110.82 kN/m² olarak bulunmuştur. Katkılı örneklerin kür öncesi c değerleri 57.22-133.38 kN/m² arasında, kür sonrası c değerleri ise 112.65-380.51 kN/m² arasında değişmektedir (Tablo 5).



Şekil 6. Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deney Sonrası Örneklerdeki Yenilmeler

Tablo 5. Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyine Ait Sonuçlar

| Örnek | c (kN/m ²) | |
|----------------------|------------------------|---------------|
| | Kürsüz | 28 günlük kür |
| K | 98.07 | 110.82 |
| K + %5 AT | 60.01 | 115.98 |
| K + %5 BT | 57.22 | 112.65 |
| K + %10 AT | 63.21 | 127.11 |
| K + %10 BT | 60.29 | 118.00 |
| K + %5 KRÇ | 125.53 | 225.59 |
| K + %10 KRÇ | 133.38 | 380.51 |
| K + %5 AT + %5 KRÇ | 82.38 | 161.82 |
| K + %5 BT + %5 KRÇ | 81.40 | 124.55 |
| K + %10 AT + %5 KRÇ | 87.01 | 172.45 |
| K + %10 BT + %5 KRÇ | 84.68 | 145.91 |
| K + %5 AT + %10 KRÇ | 68.65 | 294.21 |
| K + %5 BT + %10 KRÇ | 66.69 | 283.42 |
| K + %10 AT + %10 KRÇ | 73.20 | 335.50 |
| K + %10 BT + %10 KRÇ | 70.63 | 325.00 |

K: Kil, KRÇ: Sönmüş Kireç, AT: Asidik Tüf, BT: Bazik Tüf

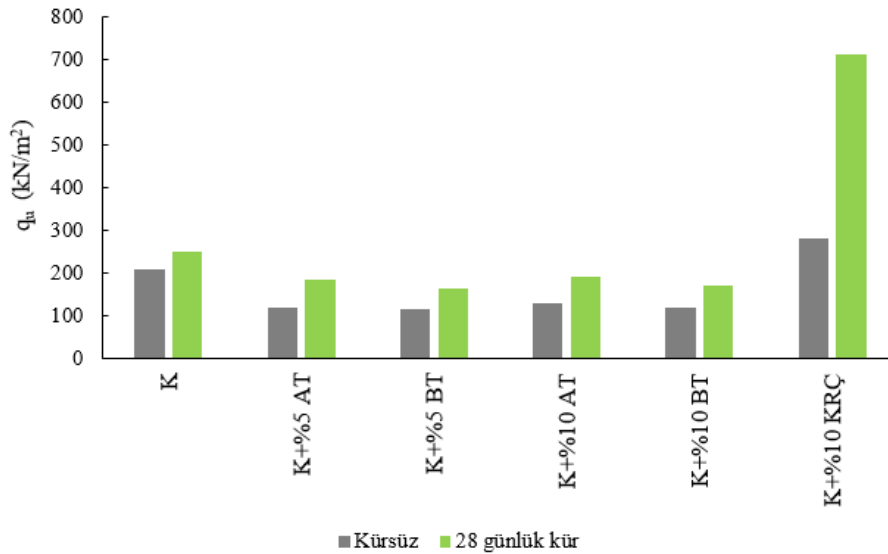
DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Deney sonuçlarının değerlendirilmesi tek katkı malzemesi ve iki katkı malzemesinin kullanıldığı karışımlar olmak üzere iki grupta yapılmıştır.

Tek Katkı Malzemesi Kullanılarak Hazırlanan Örneklerin Kür Öncesi ve Kür Sonrası q_u ve c Değerlerinin Karşılaştırılması

Tek katkı malzemesi kullanılarak hazırlanan örneklerde kür öncesi q_u değerleri 115.30-280.48 kN/m² arasında, kür sonrası q_u değerleri ise 162.10-712.97 kN/m² arasında değişmektedir (Tablo 4, Şekil 7).

Kür öncesinde katkısız kile göre, %10 KRÇ katkılı örnek hariç tüm örneklerde serbest basınç dayanımı azalmıştır. Kür sonrasında ise q_u değerleri %5 KRÇ ve %10 KRÇ katkılı örneklerde belirgin oranda artmış, ancak asidik ve bazik tüfün farklı oranda kullanıldığı örneklerde azalmıştır. Hem kür öncesi hem de kür sonrası en büyük q_u değeri %10 KRÇ katkılı örnekte, en küçük q_u değeri ise %5 BT katkılı örnekte belirlenmiştir (Tablo 4).

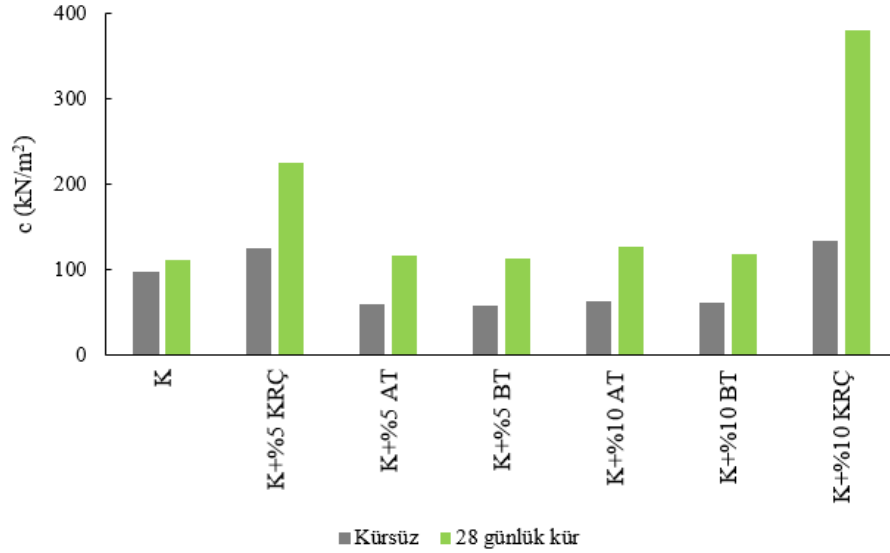


Şekil 7. Tek Katkı Malzemesi Kullanılan Örneklerle Ait Kür Öncesi ve Kür Sonrası q_u Değerlerini Gösteren Histogram

Katkısız kile göre c değerleri kür öncesinde, %5 KRÇ ve %10 KRÇ katkılı örnekler hariç örneklerin tamamında azalmıştır. Kür sonrasında ise tüm örneklerin c değerinde artış meydana gelmiştir. Tek katkı malzemesi kullanılan

örneklerin kür öncesi c değerleri 57.22-133.38 kN/m^2 arasında, kür sonrası c değerleri ise 112.65-380.51 kN/m^2 arasında değişmektedir (Tablo 5, Şekil 8).

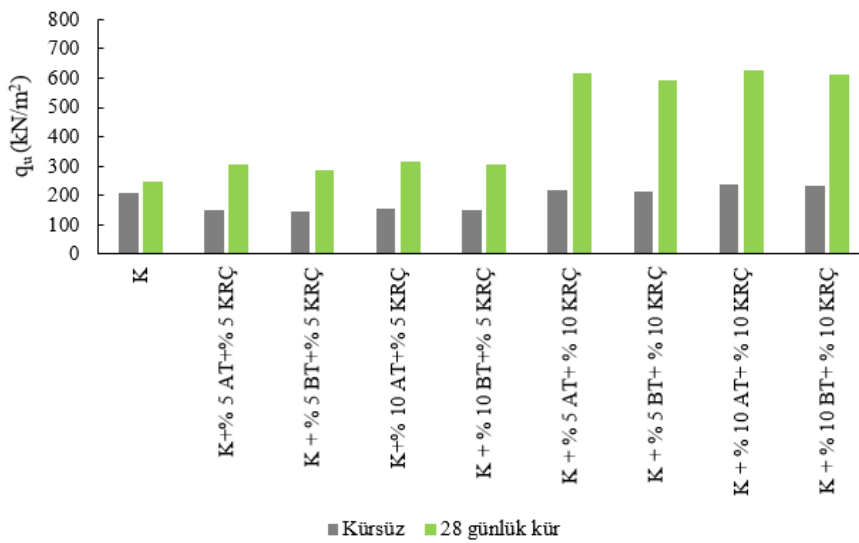
Kür sonrasında hem q_u hem de c değerleri önemli oranda artmıştır, özellikle kireç katkısının kullanıldığı örneklerde bu değişim çok belirgindir. %10 KRÇ katkılı karışımların hem q_u hem de c değerleri, %5 KRÇ katkılı karışımlara göre çok daha büyük oranlarda artış göstermiştir.



Şekil 8. Tek Katkı Malzemesi Kullanılan Örnekler Ait Kür Öncesi ve Kür Sonrası c Değerlerini Gösteren Histogram

İki Katkı Malzemesi Kullanılarak Hazırlanan Örneklerin Kür Öncesi ve Kür Sonrası q_u ve c Değerlerinin Karşılaştırılması

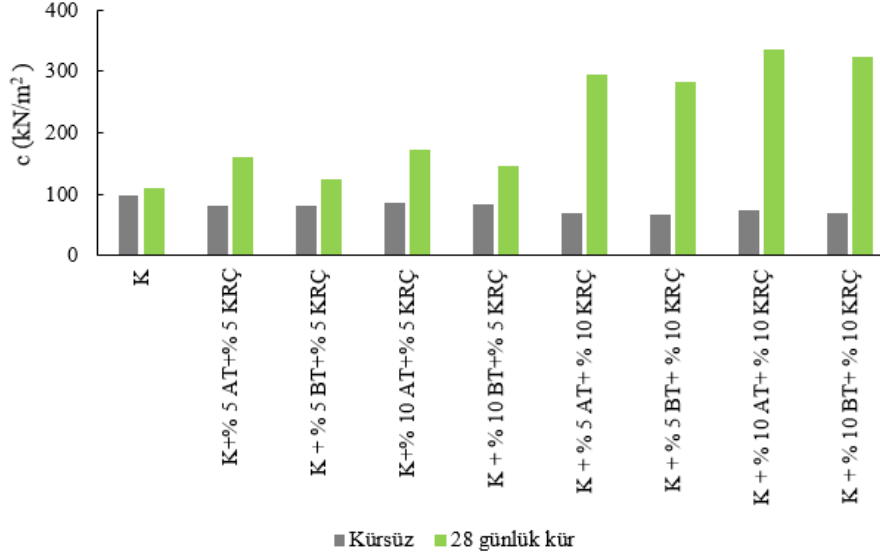
Bu aşamada farklı oranlardaki asidik ve bazik tuf katkıları kireç ile karıştırılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. İki katkı malzemesinin kullanıldığı örneklerde kür öncesi q_u değerleri 146.12-240.25 kN/m^2 , kür sonrasında ise 288.33-627.12 kN/m^2 olarak belirlenmiştir (Tablo 4, Şekil 9). Kür öncesi ve kür sonrasında en büyük dayanım değeri, %10 AT + %10 KRÇ katkılı örnekte, en küçük dayanım değeri ise %5 BT + %5 KRÇ katkılı örnekte tespit edilmiştir. Tuf ve kireç katkı oranı arttıkça tüm örneklerde dayanımın arttığı, özellikle kürle birlikte asidik tuf ve kirecin birlikte kullanıldığı örneklerde dayanım değerlerinin çok daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Tablo 4).



Şekil 9. İki Katkı Malzemesi Kullanılan Örnekler Ait Kür Öncesi ve Kür Sonrası q_u Değerlerini Gösteren Histogram

İki katkı malzemesinin kullanıldığı örneklerde c değerleri incelendiğinde ise dayanımla benzer değişimler geliştiği gözlenmiştir. Örneklerde kür öncesi c değerleri 66.69-87.01 kN/m^2 , kür sonrasında ise 124.55-335.50 kN/m^2 arasında

değişmektedir Kür öncesinde c değeri katkısız kile göre tüm örneklerde azalmıştır ve en yüksek c değeri ise %10 AT + %5 KRÇ, en düşük c değeri ise %5 BT + %10 KRÇ katkılı örnekte belirlenmiştir. Kür sonrasında ise en yüksek c değeri %10 AT + %10 KRÇ katkılı örnekte, en düşük c değeri ise %5 BT + %5 KRÇ katkılı örnekte meydana gelmiştir (Tablo 5, Şekil 10). c değerlerinde belirlenen değişimler, dayanımda meydana gelen değişimlerle paralellik sunmaktadır ve asidik tufün kireçle kullanıldığı örnekler özellikle maksimum dayanım ve kohezyon değerlerini vermiştir.



Şekil 10. İki Katkı Malzemesi Kullanılan Örneklere Ait Kür Öncesi ve Kür Sonrası c Değerlerini Gösteren Histogram

TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Kür öncesi serbest basınç dayanımı katkısız kile göre %10 KRÇ, %5 AT + %10 KRÇ, %5 BT + %10 KRÇ, %10 AT + %10 KRÇ, %10 BT + %10 KRÇ katkılı örnekler hariç diğer örneklerde azalmıştır. Kür sonrasında ise asidik ve bazik tufün tek başına kullanıldığı örnekler hariç tamamında q_u değerleri artmıştır.

%10 KRÇ katkılı örnekte kür öncesinde q_u değerindeki artış oranı %35.54 iken, kür sonrasındaki artış oranı ise %186.22'dir. Dayanımın en az arttığı örnek olan %5 BT + %5 KRÇ katkılı örneğin q_u değerinde ise kür sonrasında %15.75 oranında artış görülmüştür (Tablo 6). Asidik tuf, bazik tuf ve kireç katkı oranının artmasıyla birlikte kür öncesi ve kür sonrası dayanım değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Özellikle kireç katkılı örneklerin dayanım değerleri belirgin bir şekilde artış göstermiştir.

c değerleri ise kür öncesinde katkısız kile göre %5 KRÇ ve %10 KRÇ katkılı örnek hariç tüm örneklerde azalmıştır. Ancak kür sonrasında bütün örneklerde c değerleri artış göstermiştir.

Kür öncesinde kohezyon değerindeki en büyük artış %10 KRÇ katkılı örnekte (%36.00), kür sonrasında da aynı durum söz konusu olup %10 KRÇ katkılı örnekte c değeri %243.36 oranında bir artış göstermiştir. %5 BT katkılı örnekte ise en küçük artış %1.65 olarak belirlenmiştir (Tablo 6).

Kür öncesinde kil ve katkı malzemeleri arasında yeterli puzolanik reaksiyon gelişmediği için dayanım ve kohezyon değerleri azalmıştır. Hem dayanım hem de kohezyon açısından en etkili karışımların sadece kirecin kullanıldığı tekli karışımlar ve kireç-asidik tufün birlikte kullanıldığı ikili karışımlar olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu katkıların artan oranlarında kür uygulanmasıyla birlikte q_u ve c değerlerinde daha belirgin artışlar olduğu ortaya konmuştur.

Katkı eklendikten sonra zamana bağlı olarak kil daneleri arasındaki boşluklarda gelişen puzolanik reaksiyonlar sonucunda, daneler arası boşluklar azalmakta ve dayanım artmaktadır (Özyadın, 2000). Kil mineralleri ile sönmüş kireç arasında meydana gelen puzolanik reaksiyon sonucunda oluşan kalsiyum silikat jeli boşlukları doldurarak zemin daneleri arasında bağlayıcı görevi görmekte ve böylece zeminin dayanımını artırmaktadır (Ghabae, 2015; Asgari et al., 2015). Bu çalışmada, kür öncesi ve kür sonrasında özellikle 10 KRÇ katkılı örneğin c ve q_u değerlerinde büyük oranda artış meydana gelmiştir.

Tablo 6. Katkısız ve Katkılı Kil Örneklerinin q_u ve c Değerlerinin % Değişim Değerleri

| Örnek | Kürsüz Değişim (%) | | 28 günlük kür Değişim (%) | |
|----------------------|--------------------|--------|---------------------------|--------|
| | q_u | c | q_u | c |
| K | - | - | - | - |
| K + %5 AT | -41.89 | -38.81 | -25.65 | 4.66 |
| K + %5 BT | -44.28 | -41.65 | -34.92 | 1.65 |
| K + %10 AT | -37.59 | -35.55 | -22.83 | 14.70 |
| K + %10 BT | -41.95 | -38.52 | -31.71 | 6.48 |
| K + %5 KRÇ | -3.3 | 28.00 | 75.59 | 103.54 |
| K + %10 KRÇ | 35.54 | 36.00 | 186.22 | 243.36 |
| K + %5 AT + %5 KRÇ | -27.96 | -16.00 | 23.23 | 46.02 |
| K + %5 BT + %5 KRÇ | -29.39 | -17.00 | 15.75 | 12.39 |
| K + %10 AT + %5 KRÇ | -24.78 | -11.28 | 26.10 | 55.61 |
| K + %10 BT + %5 KRÇ | -27.42 | -13.65 | 22.36 | 31.66 |
| K + %5 AT + %10 KRÇ | 6.60 | -30.00 | 147.24 | 165.48 |
| K + %5 BT + %10 KRÇ | 3.05 | -32.00 | 138.58 | 155.75 |
| K + %10 AT + %10 KRÇ | 16.10 | -25.36 | 151.75 | 202.74 |
| K + %10 BT + %10 KRÇ | 13.56 | -27.98 | 145.12 | 193.27 |

K: Kil, KRÇ: Sönmüş Kireç, AT: Asidik Tüf, BT: Bazik Tüf

Tek başına %5 KRÇ ve %10 KRÇ katkısının kullanıldığı örneklerde görülen belirgin artışın sebebi ise diğer karışımlara göre meydana gelen puzolanik reaksiyonların daha hızlı ve daha fazla gerçekleşmesidir. Kür süresi arttıkça serbest basınç dayanımlarında görülen artış puzolanik reaksiyonların oluştuğunu göstermektedir. Bununla birlikte, sönmüş kireçle birlikte tüflerin kullanılmasının çimentolaşma reaksiyonlarında negatif bir etki oluşturduğu söylenebilir. %10 KRÇ katkılı örneklerin, serbest basınç dayanımı ve kohezyon değerleri incelendiğinde diğer karışımlara göre çok daha fazla iyileşme sağladığı görülmektedir.

Kirecin bazik tüf ile birlikte kullanıldığı örneklerde dayanımdaki azalma biraz daha fazladır. Bu sonuçlara göre stabilizasyonda asidik tüfün bazik tüfe göre daha etkili olduğu söylenebilir. Tüflerin plastik özelliği olmaması nedeniyle karışımların kohezyonunu azaltmakta dolayısıyla serbest basınç dayanımı değerlerini düşürmektedir. Asidik tüfün düşük aktif CaO içeriği, bazik tüfün ise düşük $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ sebebiyle tüflerin tek başına kullanıldığı örneklerde taneleri birbirine kenetleyen ürünler kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H), kalsiyum alümina hidrat (C-A-H), kalsiyum alümina-silika hidrat (C-A-S-H)'yi oluşturacak puzolanik reaksiyonların gerçekleşmemesi/az gerçekleşmesi ve düşen kohezyonu karşılayamaması nedeniyle serbest basınç dayanımı değerlerinde düşüşlerin meydana geldiğini söylemek mümkündür. Kirece tüf katkılarının eklenmesi dayanımı bir miktar azaltmıştır fakat kür öncesi değerlere göre yine de oldukça yüksek dayanım ve kohezyon değerleri elde edilmiştir. Kirecin bazik tüfle birlikte kullanılması, dayanımı asidik tüfle birlikte kullanıldığı duruma göre daha fazla azaltmıştır.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, katkı malzemesi olarak farklı özellikteki tüfler ile birlikte sönmüş kireç kullanımının bentonitin serbest basınç ve drenajsız kayma dayanımına olan etkileri incelenmiştir. Bu amaçla kile farklı oranlarda sönmüş kireç ve kireçle birlikte asidik/bazik tüf katılarak toplam 15 ayrı karışım hazırlanmış ve optimum su içeriğinde sıkıştırılan örneklerde serbest basınç ve üç eksenli sıkışma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile elde edilen sonuçları şu şekilde sıralamak mümkündür;

Kür öncesinde;

- Kür öncesinde q_u değerleri %10 KRÇ katkılı örnek hariç, c değerleri ise %5 KRÇ ve %10 KRÇ katkılı örnekler hariç tüm örneklerde azalmıştır.
- Kirecin tek katkı malzemesi olarak kullanıldığı örneklerde en büyük c ve q_u değerleri belirlenmiştir ve %10 KRÇ katkılı örnekte en büyük değerler bulunmuştur.
- Tek katkı malzemesi kullanılarak hazırlanan örneklerde asidik ve bazik tüfün kullanılması c ve q_u değerlerini düşürmektedir.

-%5 KRÇ katkılı örnekler, %10 KRÇ katkılı örneklerle ile karşılaştırıldığında c ve q_u değerlerindeki artış %10KRÇ katkılı örneklerde daha fazladır.

- Hem %5 KRÇ hem de %10 KRÇ katkılı örneklerde bazik tuf katkısı kullanılması asidik tüfe oranla c ve q_u değerlerinde daha fazla azalma meydana getirmiştir.

Kür sonrasında;

- c ve q_u değerleri tüm karışımlarda büyük oranda artış göstermiştir ve en büyük artış %10 KRÇ katkılı örnekte meydana gelmiştir.

-Tek katkı malzemesi kullanılarak hazırlanan örneklerde asidik ve bazik tufün kullanılması c ve q_u değerlerini düşürmektedir.

- İki katkı malzemesinin kullanıldığı örneklerde c ve q_u değerlerindeki artış %10 KRÇ katkılı örneklerde, %5 KRÇ katkılı örneklere göre daha fazladır.

- Hem %5 KRÇ hem de %10 KRÇ katkısıyla birlikte asidik/bazik tufün kullanıldığı örneklerde c ve q_u değerleri bir miktar azalmıştır, bu azalma bazik tufün kullanıldığı örnekte daha fazladır.

Sonuç olarak sönmüş kireçle birlikte tufelerin kullanılmasının çimentolaşma reaksiyonlarında negatif bir etki oluşturduğu, kireçle birlikte kullanılan asidik tufün bazik tüfe göre stabilizasyonda daha etkin olduğu, fakat kirecin tek başına daha fazla iyileştirme sağladığı belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından MF.16.64 numaralı proje ile maddi olarak desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Akbulut, A. (1996). Bentonit. MTA Eğitim Serisi-32, Ankara.

Aksoy, H.S., Yılmaz, M., & Akarsu, E.E. (2008). Killi bir zeminin Tunçbilek uçucu külü kullanılarak stabilizasyonu. *Doğu Anadolu Bölgeleri Araştırmaları*, 6(3), 88-92

Al-Rawas, A.A., Hago, A.W., & Al-Sarmi, H. (2005). Effect of lime, cement and artificial pozzolan on the swelling potential of an expansive soil from Oman. *Building & Environment*, 40(5), 681–687. doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.028

Asgari, M. R., Dezfuli Baghebandzadeh, A., & Bayat, M. (2015). Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime. *Arabian Journal of Geosciences* 8(3), 1439–1452. doi.org/10.1007/s12517-013-1173-1

Aslan Topçuoğlu, Y. (2020). Farklı katkı maddelerinin zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi. Doktora Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ 316s.

ASTM C 618-12, (2012). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in Concrete. West Conshohocken, ASTM International, PA.

ASTM D 698-12e2, (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D 2850-15, (2015). Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D 2166M-16, (2016). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Attoh-Okine, N.O. (1995). Lime treatment of laterite soils and gravels-revisited. *Construction and Building Materials*, 9(5), 283–287. doi.org/10.1016/0950-0618(95)00030-J

Azadegan, O.A., Jafari, S.H., & Li, J. (2012). Compaction characteristics and mechanical properties of lime/cement treated granular soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17, 2275–2284.

Boardman, D.I., Glendinning, S., & Rogers, C.D.F. (2001). Development of stabilization and solidification in lime-clay mixes. *Geotechnique*, 51(6), 533–543. doi.org/10.1680/geot.2001.51.6.533

- Bulut, Ü. (2007). Perlitin Puzolanik Aktivitesi. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı, İstanbul 175s.
- Bulut Karaca, Ü., & Tanaçan, L. (2009). Perlitin puzolanik aktivitesi. *İTÜ Dergisi/A Mimarlık, Planlama, Tasarım*, 8(1), 81-89.
- Calik, U., & Sadoglu, E. (2014). Engineering properties of expansive clayey soil stabilized with lime and Perlite. *Geomechanics and Engineering*, 6(4), 403–418. doi.org/10.12989/gae.2014.6.4.403
- Chong, S.Y., & Kassim, K.A. (2014). Consolidation characteristics of lime column and Geotextile Encapsulated Lime Column (GELC) stabilized pontian marine clay. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19, 129–141
- Cuisinier, O., Auriol, J-C., Le Borgne, T. & Deneele, D. (2011). Microstructure and hydraulic conductivity of a compacted lime-treated soil. *Engineering Geology*, 123(3), 187-193. doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.07.010
- Çelik, Z.H. (2020). Zemin stabilizasyonunda pomza taşının incelik etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bayburt Üniversitesi / Lisansüstü Eğitim Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bayburt
- Çimen, Ö., & Coşan, F.Ş., (2019) Volkanik tüf ve amorf silikanın kilin mühendislik özelliklerine etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 7(3), 459-466. DOI: 10.21923/jesd.427775
- Çimen, Ö., Dereli, B., & Keleş, E. (2020). Üç Farklı Bölgeye Ait Pomzanın Yüksek Plastisiteli Kile Etkisinin Karşılaştırılması. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi BEU Journal of Science*, 9 (1), 427-433.
- Fındık, S. (2005). Karayolu Esnek Üstyapıları Alttemel Tabakasının Stabilizasyonunda Hafif Agregaların Kullanılabilirliği. Yüksek Lisans tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Isparta
- Harichane, K., Ghrici, M., Khebizi, W., & Missoum, H. (2011). Effet de la combinaison de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur la durabilité des sols argileux. Proceedings of 29th meeting of AUGC-Tlemcen, Algeria, 65–75
- Hossain, K.M.A., & Mol, L. (2011). Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3495–3501. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.042
- Geiman, C.M. (2005). Stabilization of soft clay subgrades in virginia phase 1 laboratory study. M.A. Thesis Virginia Polytechnic Institute and State University, Civil Engineering.
- Genç, S. (2009). Şişen zeminler ve bentonit-kaolin karışımlarının şişme özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Ghabae, S. (2015). Kireç ile stabilize edilmiş bentonitin kür süresinin mukavemet üzerindeki etkisi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul 129s.
- Goodarzi, A. R., Goodarzi, Sh., & Akbari, H. R. (2015). Assessing geo-mechanical and micro-structural performance of modified expansive clayey soil by silica fume as industrial waste. *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering*, 39, 333–350. doi.org/10.22099/IJSTC.2015.3138
- Kalkan, E., & Akbulut, S. (2004). The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners. *Engineering Geology*, 73(1-2), 145–156. doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.001
- Kavlak, Y. (2008). Isparta Gelincik pomzasının karayolu esnek üstyapıları taban zemini stabilizasyonunda kullanımı. Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta 91s.
- Kinuthia, J.M., Wild, S., & Jones, G.I. (1999). Effects of monovalent and divalent metal sulphates on consistency and compaction of lime-stabilised kaolinite. *Applied Clay Science*, 14(1-3), 27–45. doi.org/10.1016/S0169-1317(98)00046-5
- Keskin, S.N., & Çimen, Ö. (1997). Killi zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde pomza kullanımının araştırılması. I. Isparta Pomza Sempozyumu, (pp. 97-101).
- Lin, B., Cerato, Amy, B., Madden, Andrew S., & Madden, Megan E Elwood. (2013). Effect of Fly Ash on the Behavior of Expansive Soils: Microscopic Analysis. *Environmental Engineering Geoscience*, 19(1), 85–94. doi.org/10.2113/gseegeosci.19.1.85

- Little, D.N., Scullion, T., Kota, P.B.V.S., & Bhuiyan, J. (1995). Guidelines for mixture design and thickness design for stabilized bases and subgrades. Texas A and M University.
- Locat, J., Berube, M.A., & Choquette, M. (1990). Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: Shear strength development. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(3), 294–304, doi.org/10.1139/t90-040
- Mahamedi, A., & Khemissa, M. (2013). Cement stabilization of compacted expansive clay. *The Online Journal of Science and Technology*, 3(1), 33–38
- Mallela, J., Harold Von Quintus, P., Smith, K.L., & Consultants, E. (2004). Consideration of limestabilized layers in mechanistic-empirical pavement design. The National Lime Association, Arlington, Virginia, USA.
- Okucu, A. (1998). Bigadiç ve Turnatepe (Balıkesir) yörelerindeki zeolitik ve perlitik tüflerin puzolanik özellikleri. Doktora Tezi. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir 152s.
- Önem, Y. (2000). Sanayi Madenleri. Kozan Ofset, Ankara.
- Özaydın, K. (2012). Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği, Ondördüncü Ulusal Kongresi, İstanbul
- Puppala A.J., Ramakrishna A.M., & Hoyos L.R. (2003). Resilient moduli of treated clays from repeated load triaxial test. *Transportation Research Records: Journal of Transportation Research Board*, 1821(1), 68–74, doi.org/10.3141/1821-08
- Ramadas, T, Kumar, N.D., & Yesuratnam, G. (2011). Geotechnical characteristics of three expansive soils treated with lime and flyash. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 4(6), 46-49.
- TS 25, (2008). Doğal puzolan (tras) - çimento ve betonda kullanılan-tarifler, Gerekler ve Uygunluk Kriterleri.
- Ün, H. (2007). PAÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Ders Notları, Denizli.
- Voottipruex, P., & Jamsawang, P. (2014). Characteristics of expansive soils improved with cement and fly ash in Northern Thailand. *Geomechanics and Engineering*, 6(5), 437–453. doi: 10.12989/gae.2014.6.5.437
- Yang, G., Liu, H., Lv, P., & Zhang, B. (2012). Geogrid-reinforced lime-treated cohesive soil retaining wall: Case study and implications. *Geotextiles and Geomembranes*, 35, 112–118. doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.09.001
- Yılmaz, F. (2017). Stabilizasyonunda puzolanik katkı inceliğinin dayanıma etkisi. *AKÜ FEMÜBİD 17*, 035601 (1048-1054). doi: 10.5578/fmbd.64080
- Wang, A., Zhang, C., & Sun, W. (2003). Fly ash effects: I. the morphological effect of fly ash. *Cement and Concrete Research*, 33, 2023–2029. doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00217-5
- Wild, S., Kinuthia, J., Robinson, R. and Humphreys, I. (1996). Effects of ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength and swelling properties of lime-stabilized kaolinite in the presence of sulphates. *Clay Minerals*, 31(3), 423–433. doi: 10.1180/claymin.1996.031.3.12