

Zemin Stabilizasyonunda Pozolanik Katkı İnceliğinin Dayanıma Etkisi

Fatih YILMAZ¹

¹ Bayburt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bayburt.

e-posta: fyilmaz@bayburt.edu.tr

Geliş Tarihi: 11.12.2016

;

Kabul Tarihi: 19.11.2017

Özet

Anahtar kelimeler

“Stabilizasyon”;

“Kil”;

“Puzolanik katkı”;

“Perlit”;

“Kireç”

Mühendislik özellikleri zayıf olan zeminlerin fiziksel, kimyasal, mekanik ve hidrolik özelliklerinin iyileştirilmesine zemin stabilizasyonu denilmektedir. Bu çalışma kapsamında tek başına çimentolaşma kabiliyeti yetersiz olan perlit, puzolanik katkı olarak killi bir zeminin stabilizasyonunda kullanılmıştır. Birincil bağlayıcı olarak yüksek CaO içeriğinden dolayı kireç seçilmiştir. Zemin, %6 kireç (optimum kireç oranı) ve %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında perlitte karıştırılmıştır. Puzolanik katkı olarak kullanılan perlit doğal ve ince öğütülmüş biçimde iki farklı şekilde stabilizasyon çalışmasında değerlendirilmiştir. Hazırlanan karışımların indeks ve dayanım özellikleriyle bu özelliklerin perlitin inceltmesiyle nasıl değiştiği çalışma kapsamında ele alınmıştır. 84 günlük kür süresi sonucunda en yüksek serbest basınç dayanımı %20 perlit içeren kireçli numunelerde 3196 kPa olarak tespit edilmiştir. İnceltmiş perlitin katkı maddesi olarak kullanıldığı kireçli numunelerde ise en yüksek dayanım inceltmiş perlit oranı %15 olan numunelerde 3408,9 kPa değerine ulaşmıştır. Perlitin inceltmesiyle birlikte daha düşük perlit oranlarında daha yüksek mukavemet değerlerinin meydana geldiği belirlenen bu deneysel çalışma sonunda, puzolanik katkı olan perlitin inceltmesinin dayanım değerlerini doğrudan etkilediği tespit edilmiştir.

Fineness Effect of Pozzolanic Additive on Strength in Soil Stabilization

Abstract

Keywords

“Stabilization”;

“Clay”;

“Pozzolanic additive”;

“Perlite”;

“Lime”

Improvement of physical, chemical, mechanical and hydraulic properties of poor bearing soil is called soil stabilization. Within the scope of this study perlite, has inadequate cementing ability by oneself, was used as a pozzolanic additive in stabilization of clayey soil. Lime was chosen as a primary binder due to its high CaO content. Soil was mixed with 6% of lime (optimum lime ratio) and 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% of perlite. Pozzolanic additive perlite was evaluated in natural and finely granulated forms in stabilization study. Geotechnical properties such as index and strength features of mixtures and how this properties may change by fining perlite was considered in the scope of this study. After 84 days of curing period, the highest unconfined compressive strength was determined as 3196 kPa in the samples containing lime and 20% perlite. Samples in which fine perlite was used as an additive material, the highest unconfined compressive strength was reached 3408.9 kPa in samples containing lime and 15% fine perlite. As a result of this study, in which by fining of perlite lower perlite rate gives higher strength values, it was found that fineness of pozzolanic additive perlite has direct effect in strength values.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Geoteknik mühendisliği açısından elverişsiz olarak kabul edilen zeminlerin amaçlanan bir mühendislik uygulamasında kullanılmak üzere iyileştirilmesi işlemine zemin stabilizasyonu denilir. İnce taneli zeminlerin kimyasal stabilizasyonunda kullanılan başlıca katkı maddeleri kireç ve çimentodur. Bu ana bağlayıcıların etkinliğini

arttırmak ve katı atık yönetimi kapsamında endüstriyel atıkları değerlendirmek amacıyla farklı türdeki fabrika atıkları stabilizasyon çalışmalarında kullanılmaya başlanmıştır. Bunların yanı sıra puzolanların zemin iyileştirme çalışmalarında değerlendirilmesi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Yılmaz *et al.* 2015, Calik and Sadoglu 2014, Celik and Nalbantoglu 2013, Yılmaz and Yurdakul 2017).

Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık değeri bulunmayan veya bağlayıcılık özelliği çok az olan, fakat ince taneli haldeyken sulu ortamda kalsiyum hidroksitle (Ca(OH)_2) bütünleşince hidrolik bağlayıcılık özelliğini kazanan silikalı ve alüminalı malzemelerdir (Bulut and Tanaçan 2009).

Puzolanlar kimyasal bileşenleri bakımından silikat ve alüminat (SiO_2 ve Al_2O_3) esaslı iken kireç ve çimento CaO esaslıdır. Bu yüzden puzolanların birçoğu kendi başlarına bağlayıcı özellikte değildir. Bu özelliklerinden dolayı puzolanlar genellikle ikincil bağlayıcıdır. Puzolanlar, normal sıcaklık değerlerinde, sulu ortamda ve bilhassa kireçle birleşerek bağlayıcılık özelliğine sahip olabilen malzemelerdir (Yılmaz, 2015).

Urhan (1991) tarafından yapılan çalışmada kristal yapıdaki atom örgülerinin sık ve düzenli olduğu için çözünmelerinin güç olduğu belirtilmiştir. Camsı yapıdaki atom örgüleri ise hem daha dağınık hem de daha aralıktır. Perlit, obsidyen parçacıkları içeren asidik karakterli volkanik bir camdır ve mineralojik karakter açısından %3-10'u kristalleşmiş mineraller içerir. Fibrik yapılmayan perlit, ayrıca nitrat, sülfat, fosfor, ağır metal ve organik madde de içermez. Kimyasal açıdan saf olan perlit insan sağlığı için herhangi bir sakıncalı bileşik içermemektedir (Bulut ve Tanaçan 2009).

Kireçle birlikte yapılan stabilizasyon çalışmalarında sönmüş kireç (hidrate kireç, Ca(OH)_2) veya sönmemiş kireç (CaO) kullanılmaktadır. Bell (1996), yaptığı stabilizasyon çalışmasında killi zemine belli yüzdelerde kireç ilave ederek en uygun kireç yüzdesinin %4-6 olduğunu belirlemiştir. Kireçle stabilizasyon sonucu meydana gelen olaylar; katyon değişimi, çimentolaşma ve karbonatlaşmadır (Yıldırım, 2002).

Ola (1978), killi zeminlerde %10'dan daha fazla kireç ilavesinin dayanım değerlerinde ciddi bir artış meydana getirmediğini tespit etmiştir. Eren ve Filiz (2009) tarafından yapılan çalışmada %8 oranında kirecin katkı maddesi olarak kullanılmasıyla birlikte, zeminin şişme davranışının sonlandığı tespit edilmiştir.

Al-Mukhtar ve ark. (2010), yüksek plastisiteli killi zeminin kireçle stabilizasyonunda kür sıcaklığının 50 °C'de tutulmasının 20 °C'de tutulmasına göre puzolanik özelliklerde ve zeminin mühendislik özelliklerinde iyileştirmeler meydana getirdiğini tespit etmişlerdir. Rajasekaran ve Rao (2002), yaptıkları kireçle stabilizasyon çalışmasında aşırı plastik bir zeminin permeabilite katsayısının kirecin etkisiyle zaman içinde 15-18 kat arttığını tespit etmişlerdir.

Calik ve Sadoglu (2014) çalışmalarında perlit ve kirecin birleşiminin; zeminin işlenebilirlik, plastisite, geçirimsizlik, sıkışabilirlik, dayanım ve durabilite gibi geoteknik özelliklerini sadece perlite veya sadece kirece göre daha çok iyileştirdiğini tespit etmişlerdir.

Geçmişten günümüze yapılan stabilizasyon çalışmalarına bakıldığında, puzolanik katkı maddesi inceliğinin dayanım değerlerine etkisi incelenmemiştir. Bu çalışmanın ana gayesi doğal puzolanik bir katkı olan perlitin zemin stabilizasyonunda iki farklı incelikte kireçle birlikte kullanılması ve perlitin inceltmesiyle birlikte dayanım değerlerinde meydana gelen değerlerin incelenmesidir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada yapılan deneylerde kullanılan malzemeler; doğal malzeme, kireç ve perlit. Perlit doğal halde ve 74 mikron altı malzeme olmak üzere iki farklı biçimde stabilizasyon çalışmasında kullanılmıştır. Doğal malzeme, Bayburt ili Demirözü ilçesinden temin edilmiştir. Deney numuneleri doğal malzemeyle kirecin iki farklı incelikteki perlitte karıştırılmasıyla hazırlanmıştır.

Doğal malzeme ve optimum kireç oranı (%6) ağırlığı toplamına, iki farklı incelikteki perlitin %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranları katılarak çalışmaya esas olan karışımlar hazırlanmıştır. Karışımlar hazırlanırken kuru haldeki doğal zemine öncelikle optimum oranda kireç katılmış daha sonra yukarıda belirtilen yüzdelerde birinci grup ve ikinci grup perlit katılmıştır.

Deney numuneleriyle ilgili adlandırılmalar Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Deney numunelerine ait notasyonlar

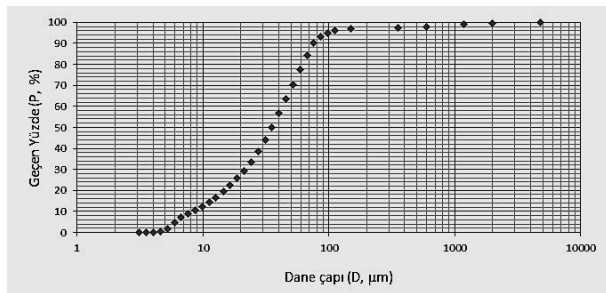
| Deney numunesi | Notasyon |
|--------------------------------------|----------|
| Zemin | S |
| Zemin ve kireç | SL |
| Zemin, kireç ve perlit | SLP |
| Zemin, kireç ve %5 perlit (1. grup) | SLP1/5 |
| Zemin, kireç ve %10 perlit (1. grup) | SLP1/10 |
| Zemin, kireç ve %15 perlit (1. grup) | SLP1/15 |
| Zemin, kireç ve %20 perlit (1. grup) | SLP1/20 |
| Zemin, kireç ve %25 perlit (1. grup) | SLP1/25 |
| Zemin, kireç ve %30 perlit (1. grup) | SLP1/30 |
| Zemin, kireç ve %5 perlit (2. grup) | SLP2/5 |
| Zemin, kireç ve %10 perlit (2. grup) | SLP2/10 |
| Zemin, kireç ve %15 perlit (2. grup) | SLP2/15 |
| Zemin, kireç ve %20 perlit (2. grup) | SLP2/20 |
| Zemin, kireç ve %25 perlit (2. grup) | SLP2/25 |
| Zemin, kireç ve %30 perlit (2. grup) | SLP2/30 |

*1.Grup: Perlit ocağından alınan perlit

*2.Grup: Elek açıklığı 0,075 mm olan elekten elenmiş perlit

Çalışma kapsamında hazırlanan deney numuneleri 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde silindirik numunelerdir. Deney numuneleri 7 gün, 28 gün ve 84 gün kür süresinde desikatörde bekletilmiştir. Serbest basınç deneyi için tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır. ASTM D 2487 (2011) standardına göre çalışma sırasında kullanılan zemin sınıfı düşük plastisiteli kil (CL) olarak belirlenmiştir. Zemin sınıfı düşük plastisiteli kil olarak belirlenen doğal malzeme için yıkamalı elek analizi ve lazer kırınım yöntemi yapılmıştır.

Özer ve Orhan (2007) tarafından araştırmada lazer kırınım yöntemiyle tane büyüklüğü dağılımı belirlenmiş ve sonuçların hidrometre yöntemiyle karşılaştırılması yapılmıştır. Lazer kırınım yönteminin çok kısa sürede sonuç vermesi, az miktarda örnek gerektirmesi, tanelerin özgül ağırlığından etkilenmemesi ve sonuçların bilgisayar ortamında olması gibi özellikleri nedeniyle bu çalışmada hidrometre yöntemi yerine lazer kırınım yöntemi kullanılmıştır. Doğal zeminin dane boyutu dağılım eğrisi Şekil 1'de verilmektedir.

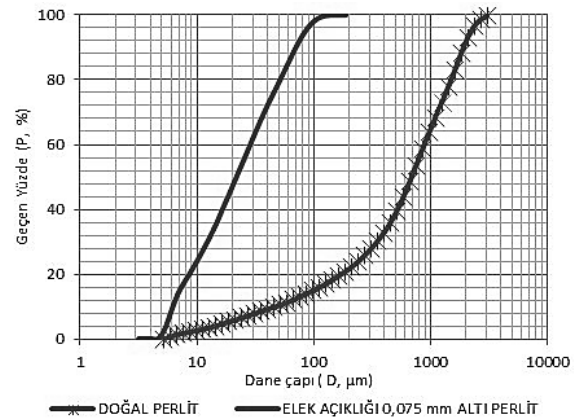
**Şekil 1.** Doğal zeminin granülometri eğrisi

Doğal malzemenin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan zemin mekaniği deneyleri sonuçları Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Doğal zeminin özellikleri

| USCS sınıflandırma | CL |
|--|------------|
| Likit limit, LL (%) | 48,8 |
| Plastik limit, PL (%) | 26,5 |
| Plastisite indisi, PI (%) | 22,3 |
| Özgül ağırlık, G_s | 2,60 |
| Optimum su içeriği, w_{opt} (%) | 23,0 |
| Maksimum kuru yoğunluk, ρ_{kmax} (Mg/m ³) | 1,63 |
| Renk | Sarımtırak |

Deneyde kullanılan kireç Karsan Kireç Sanayi Ticaret A.Ş. tarafından üretilmiş olan SKK80-söndürülmüş kalker kirecidir. Çalışma kapsamında Erzincan iline bağlı Mollaköy beldesinde yer alan perlit ocağından alınan ham, kırılmış, elenmiş perlit agregası kullanılmıştır. Deney çalışmalarında kullanılan doğal perlite ve tane çapı 0,075 mm altı olan perlite ait fotoğraflar Şekil 2'de, elek analizi sonuçları ise Şekil 3'te sunulmuştur.

**Şekil 2.** Çalışmada kullanılan doğal ve öğütülmüş perlit**Şekil 3.** Doğal ve öğütülmüş perlitin granülometri eğrisi

Doğal malzemeye ASTM D 2974 (2007) standardına uygun olarak organik madde tayini analizi yapılmıştır. Elde edilen veriler sonucunda doğal malzemenin içindeki organik madde oranı %4,8 seviyelerinde bulunmuştur. Bu değer

stabilizasyon çalışmaları için uygundur, malzeme inorganiktir.

Deney numunelerinde kullanılması gereken kireç miktarının belirlenmesi için, doğal malzemeye ASTM D 6276 (2006) standardına göre uygun bir şekilde pH deneyi yapılmıştır. Deneyde HANNA 2211 pH/ORP Meter cihazı kullanılmıştır.

Çizelge 3. pH deneyi sonuçları

| Kireç oranı | pH değeri |
|-------------|-----------|
| 1 | 9,8 |
| 2 | 11,3 |
| 3 | 12,2 |
| 4 | 12,3 |
| 5 | 12,4 |
| 6 | 12,6 |
| 7 | 12,6 |
| 8 | 12,6 |
| 9 | 12,6 |
| 10 | 12,6 |

Optimum kireç oranının belirlenebilmesi için hazırlanan solüsyonlarla ilgili pH verileri Çizelge 3'te verilmiştir. İlgili veriler incelendiğinde %5 oranında kireçli solüsyonun optimum kireç oranı şartlarını sağladığı görülmektedir. Ancak çimentolaşma için pH deneyi sonuçlarından bir miktar daha fazla kirecin kullanılması gerektiği literatür çalışmalarında mevcuttur (Al-Rawas *et al.* 2002 , Mathew and Rao 1997). Literatür araştırmalarının ışığında, çalışma kapsamındaki optimum kireç oranı değeri %6 olarak belirlenmiştir.

Calik ve Sadoglu (2014) tarafından yapılan çalışmada perlitin kirecsiz olarak doğrudan zemine katılmasıyla hazırlanan karışımların artan perlit oranında ve farklı kür sürelerinde serbest basınç dayanımı incelenmiştir. Perlitin stabilizasyon çalışmasında kirecsiz kullanılmasının artan perlit oranı ve kür sürelerinde kayda değer bir artış yapmadığı çalışma kapsamında açık bir biçimde ifade edilmiştir. Bu nedenle, bu deneysel çalışmada perlit doğrudan değil, kireçle birlikte kullanılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışma kapsamında oluşturulan ve daha önce notasyonları ifade edilmiş deney numunelerine ASTM D 4318 (2010) standardına göre likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Bu deneylere ait sonuçlar Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Numunelerin kıvam limitleri

| Deney numuneleri | Likit limit(%) | Plastik limit(%) | Plastisite indisi(%) |
|------------------|----------------|------------------|----------------------|
| S | 48,8 | 26,5 | 22,3 |
| SL | 43,4 | 32,4 | 11,0 |
| SLP1/5 | 42,9 | 33,0 | 9,9 |
| SLP1/10 | 42,2 | 33,0 | 9,2 |
| SLP1/15 | 41,3 | 32,1 | 9,2 |
| SLP1/20 | 40,6 | 31,0 | 9,6 |
| SLP1/25 | 40,0 | 29,0 | 11,0 |
| SLP1/30 | 39,1 | 28,0 | 11,1 |
| SLP2/5 | 42,9 | 33,0 | 9,9 |
| SLP2/10 | 41,9 | 34,0 | 7,9 |
| SLP2/15 | 41,7 | 34,0 | 7,7 |
| SLP2/20 | 41,7 | 34,0 | 7,7 |
| SLP2/25 | 41,2 | 32,0 | 9,2 |
| SLP2/30 | 41,0 | 31,0 | 10,0 |

Çizelge verileri irdelendiğinde optimum oranda zemine ilave edilen kirecin, likit limit ve plastisite indisi değerlerinde az miktarda düşüşler ortaya koyduğu, plastik limit değerinde ise artış meydana getirdiği tespit edilmiştir.

Karışımlar hazırlandıktan hemen sonra kıvam limitleri yapılmıştır. Doğal zemin numunesine ait likit limit ve plastisite indisi değerlerinin tüm katkılı karışımlara göre yüksek olduğu görülmektedir. SLP1 karışımlarında en düşük likit limit ve plastik limit değerleri SLP1/30 karışımlarında görülmüştür. SLP2 karışımlarında likit limit değerlerinde düşüşler meydana gelirken plastik limit ve plastisite indisi değerlerinde düzenli bir davranış ortaya konulmamıştır. Doğal zemine göre SL karışımının plastisite indisi değerinde azalma meydana gelmiştir. Artan perlit oranındaki SLP karışımlarına ait plastisite indisi değerlerinde zemine göre düşüşler meydana gelmiştir.

SLP1 ve SLP2 karışımlarıyla yapılan kompaksiyon deneylerinden elde edilen optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluk değerleri Çizelge 5'te sunulmuştur. İlgili çizelgedan yararlanılarak doğal zemine %6 kireç ilavesi sonrasında hazırlanan numunelerin kompaksiyon parametreleri incelendiğinde; maksimum kuru yoğunluk değerinde düşüş, optimum su içeriğinde ise artış görülmüştür. Kompaksiyon parametreleri incelenen SLP2 karışımlarında optimum su içeriği değerlerinde SL karışımlarına göre değerlerde artışın olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5. Numunelerin kompaksiyon parametreleri

| Deney numuneleri | Maksimum kuru yoğunluk, Mg/m ³ | Optimum su içeriği, % |
|------------------|---|-----------------------|
| S | 1,63 | 23,0 |
| SL | 1,55 | 25,5 |
| SLP1/5 | 1,57 | 24,5 |
| SLP1/10 | 1,58 | 24,0 |
| SLP1/15 | 1,58 | 23,5 |
| SLP1/20 | 1,59 | 22,0 |
| SLP1/25 | 1,60 | 21,0 |
| SLP1/30 | 1,61 | 20,0 |
| SLP2/5 | 1,56 | 25,2 |
| SLP2/10 | 1,57 | 25,0 |
| SLP2/15 | 1,58 | 24,8 |
| SLP2/20 | 1,59 | 24,7 |
| SLP2/25 | 1,59 | 24,0 |
| SLP2/30 | 1,59 | 23,5 |

Çizelge 5'teki veriler ışığında genel olarak katkılı numunelerin maksimum kuru yoğunluk değerleri 1,55-1,61 Mg/m³ arasında değişim gösterdiğini söylemek mümkündür. Optimum su içeriği değerlerinde ise %20 ile %25,5 arasında değişimler meydana geldiği tespit edilmiştir. En düşük optimum su içeriği değeri doğal perlitin %30 oranında ilave edildiği SLP1/30 karışımından elde edilmiştir.

Çalışma kapsamında hazırlanan karışımların optimum su içerikleri belirlendikten sonra, serbest basınç deneyine geçilmiştir. Deney numuneleri 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde silindir olarak hazırlanmıştır. Serbest basınç deneyleri için toplamda 126 adet numune hazırlanmıştır. Her bir notasyon için üçer numune hazırlanarak işlemler yapılmış olup serbest basınç dayanımı ortalamaları hesaba katılmıştır. Deney numuneleri için belirlenen kür süreleri 7, 28 ve 84 gündür.

Çizelge 6'da SLP1 ve SLP2 karışımlarının 7, 28 ve 84 günlük kür sonrasındaki tek eksenli serbest basınç dayanımı değerleri sunulmuştur. İlgili çizelgede açıkça ifade edildiği biçimde düşük plastisiteli kil olan doğal zeminin 84 günlük kür sonundaki tek eksenli serbest basınç dayanımı verileri, doğal zemine %6 kireç katılmasıyla yaklaşık 12 kat artış göstermiştir. Literatür karşılaştırması yapıldığında kirecin ince daneli zeminlerin stabilizasyonunda bu derecede etkin olması beklenen bir sonuçtur.

Çizelge 6. Numunelerin serbest basınç dayanımı sonuçları

| Numune | Basınç dayanımı (kPa) | | |
|---------|-----------------------|---------|---------|
| | Kür Süresi | | |
| | 7. gün | 28. gün | 84. gün |
| S | 144,6 | 148,3 | 149,1 |
| SL | 895,4 | 1515,3 | 1742,3 |
| SLP1/5 | 897,4 | 1604,6 | 2366,3 |
| SLP1/10 | 910,7 | 1823,9 | 2610,7 |
| SLP1/15 | 1028,6 | 1960,9 | 2796,0 |
| SLP1/20 | 1044,0 | 2690,5 | 3196,0 |
| SLP1/25 | 1097,4 | 2459,2 | 2889,5 |
| SLP1/30 | 1127,5 | 2329,9 | 2790,8 |
| SLP2/5 | 923,0 | 1891,1 | 2652,8 |
| SLP2/10 | 1056,1 | 2915,8 | 3324,4 |
| SLP2/15 | 1301,0 | 2964,3 | 3408,9 |
| SLP2/20 | 1184,0 | 2734,0 | 3215,0 |
| SLP2/25 | 1147,9 | 2503,6 | 2933,9 |
| SLP2/30 | 1138,7 | 2351,0 | 2812,5 |

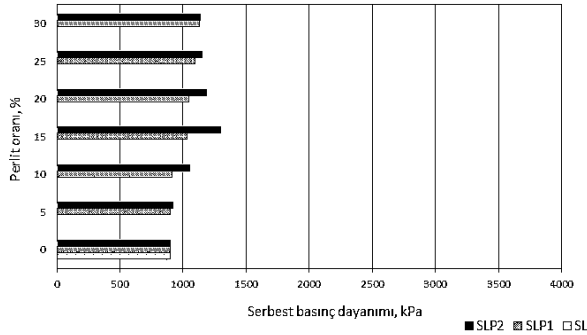
Çizelge 6 incelenmeye devam edildiğinde SLP1 karışımlarının 7 günlük kür sonrasındaki tek eksenli serbest basınç dayanımı değerlerinde SL karışımına göre daha iyi sonuçlar meydana getirdiği görülmektedir. Artan perlit oranlarında dayanım değerleri artmıştır. Ocaktan alınmış perlitin doğrudan kullanılmasıyla hazırlanan SLP1 karışımlarında artan perlit oranlarıyla birlikte serbest basınç değerleri az miktarlarda da olsa sürekli artış göstermiştir. İnceltmiş perlitin kullanıldığı SLP2 karışımlarında ise arttırılan perlit oranlarında %15 oranına kadar ilave edilen perlitte dayanımda artış olurken perlit oranının daha fazla arttırılması tek eksenli basınç dayanımı değerlerinde düşüş meydana getirmiştir. Yani maksimum dayanım %15 ince perlit katkılı numunelerde görülmüştür.

SLP1 karışımlarında 28 günlük kürün ardından yapılan tek eksenli serbest basınç dayanımında SLP1/20 karışımlarının, SL karışımlarına göre %77 oranında artış meydana geldiği tespit edilmiştir. SLP1/20 karışımlarından sonra artan perlit oranlarında dayanım kayıpları meydana gelmiştir. Maksimum veriler SLP1/20 karışımlarından elde edilmiştir. 200 nolu elek altı perlitin kullanılmasıyla hazırlanmış SLP2 karışımlarında en yüksek tek eksenli serbest basınç dayanımı SLP2/15 karışımlarından elde edilmiştir. SLP2/15 karışımlarının tek eksenli serbest basınç dayanımlarında sadece kireç bulunan SL

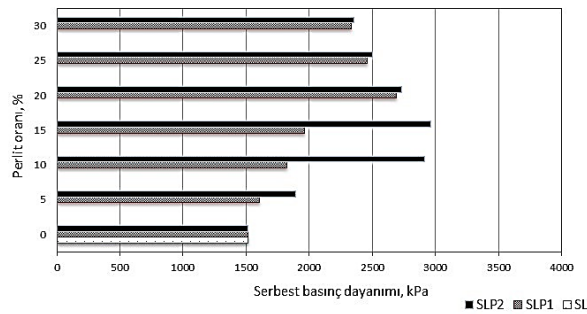
karışımlarına göre %95 oranında artış meydana gelmiştir.

SLP1 karışımlarının 84 günlük külden sonraki tek eksenli dayanım sonuçlarına bakıldığında en iyi dayanım sonucunun yine 3196,0 kPa ile SLP1/20 karışımlarından elde edilmiştir. SLP2 karışımlarında 84 günlük külden sonraki tek eksenli dayanım değerlerinde %10 ve %15 perlit oranında oldukça güçlü dayanım sonuçları vermiştir. SLP2 karışımlarındaki en iyi ve en yüksek dayanım değeri 3408,9 kPa olan SLP2/15 karışımlarından elde edilmiştir. Farklı kür sürelerinde en yüksek serbest basınç dayanımları; SLP1 numunelerinde SLP1/20, SLP2 numunelerinde SLP2/15 olmak üzere aynı numunelerde tespit edilmiştir.

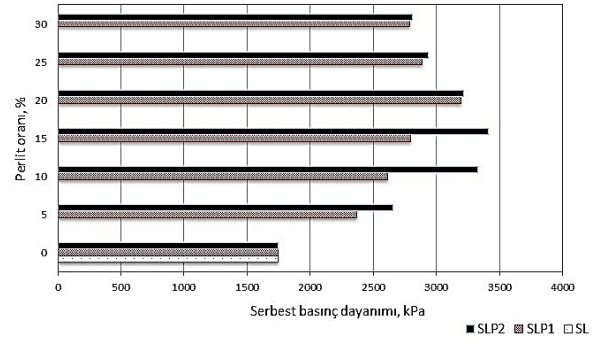
84 günlük kür sonrasında kırılan tüm numunelerin gevrek yapıda oldukları ve yoğrulabilir kıvamda olmadıkları görülmüştür. SLP1 ve SLP2 karışımlarının 7, 28 ve 84 günlük külden sonraki serbest basınç dayanımı değerlerinin değişim grafikleri sırasıyla Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 4. Numunelerin 7 günlük kür sonrası dayanımları



Şekil 5. Numunelerin 28 günlük kür sonrası dayanımları



Şekil 6. Numunelerin 84 günlük kür sonrası dayanımları

Çalışmadan elde edilen dayanım verileri ışığında, perlitin inceltilmesinin zemin stabilizasyonuna doğrudan etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Perlitin inceltilmesiyle birlikte maksimum serbest basınç dayanımının elde edildiği perlit yüzdesi azalmıştır. Bu azalma ise, daha az katkı maddesi kullanarak daha yüksek dayanım elde etmek manasına gelmektedir.

4. Sonuç

Dünya rezervinin %75'e yakınının ülkemizde olduğu ve yaklaşık ülke rezervi 7.7 milyar ton olan perlit doğal bir puzolandır. Bu doğal puzolanın zemin stabilizasyonunda kireçle birlikte kullanılabilirliğini araştıran çalışmada şu sonuçlara ulaşılmıştır.

- ✓ Zemin ve kireç karışımına perlit ilavesi dayanım değerlerini arttırmıştır. Farklı kür sürelerinde dayanım artışları sürmüştür. En iyi dayanım değeri zemin ve kireç karışımlarına %20 perlit ilavesiyle elde edilmiştir.
- ✓ Perlitin 74 mikron altına kadar öğütülüp inceltilmesiyle hazırlanan kireçli karışımlarda, sadece kirece ve kireç ile doğal haldeki perlitin beraber kullanıldığı karışımlara göre daha güçlü dayanım verileri tespit edilmiştir. En iyi dayanımlar zemin ve kireç karışımlarına öğütülmüş haldeki %15 perlit ilavesiyle elde edilirken, öğütülmüş perlitin %10 oranında katılması aynı derecede dayanım artışları ortaya koymuştur.
- ✓ Doğal puzolanın inceltilmesinin dayanım değerlerindeki asıl etkisi ise, karışıma katılan malzeme miktarları incelendiğinde ortaya çıkmaktadır. Şöyle ki; doğal haldeki perlit kullanıldığında %20 perlit oranında maksimum

dayanım elde edilirken, bu dayanım değerinden daha yüksek değerler %10 oranında öğütülmüş perlit kullanarak sağlanmıştır.

- ✓ Sonuç olarak, perlitin inceltmesiyle maksimum dayanım için gerekli puzolanik madde miktarı yarıya inmiştir. Bu sonuç ise, daha ekonomik bir stabilizasyon çalışması anlamına gelmektedir.

Kaynaklar

- Al-Mukhtar, M., Lasledj, A. and Alcover, J., F., 2010. Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 50 °C, *Applied Clay Science*, **50**, 199-203.
- Al-Rawas, A. A., Taha, R., Nelson, J. D., Al-Shab, T., B. and Al-Siyabi, H., 2002. A comparative evaluation of various additives used in the stabilization of expansive soils, *Geotechnical Testing Journal*, **25(2)**, 199-209.
- ASTM D 2487, 2011. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System), ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 2974, 2007. Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 4318, 2010. Standard Test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 6276, 2006. Standard test methods for using ph to estimate the soil-lime proportion requirement for soil stabilization, ASTM, Pennsylvania.
- Bell, F. G., 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils, *Engineering Geology*, **42**, 223-237.
- Bulut, Ü. and Tanaçan, L., 2009. Perlitin puzolanik aktivitesi. *İtüdergisi/a Mimarlık, Planlama, Tasarım*, **8 (1)**, 81-89.
- Calik, U. and Sadoglu, E., 2014. Classification, shear strength, and durability of expansive clayey soil stabilized with lime and perlite. *Natural Hazards*, **71(3)**, 1289-1303.
- Calik, U. and Sadoglu, E., 2014. Engineering properties of expansive clayey soil stabilized with lime and perlite, *Geomechanics and Engineering*, **6(4)**, 403-418.
- Celik, E. and Nalbantoglu, Z., 2013. Effects of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) on the swelling properties of lime-Stabilized sulfate-bearing soils, *Engineering Geology*, **163**, 20-25.
- Eren, S. and Filiz, M., 2009. Comparing the conventional soil stabilization methods to the consolid system used as an alternative admixture matter in Isparta Daridere material, *Construction and Building Materials*, **23**, 2473-2480.
- Mathew, P. K. and Rao, S. N., 1997. Effect of lime on cation exchange capacity of marine clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **123(2)**, 183-185.
- Ola, S. A., 1978. The geology and geotechnical properties of the black cotton soils of northeastern Nigeria, *Engineering Geology*, **12**, 375-391.
- Özer, M. and Orhan, M., 2007. Zeminlerin tane büyüklüğü dağılımının lazer kırınım yöntemiyle belirlenmesi, *Politeknik Dergisi*, **10(3)**, 331-337.
- Rajasekaran, G. and Rao, S., N., 2002. Permeability characteristics of lime treated marine clay, *Ocean Engineering*, **29**, 113-127.
- Urhan, S., 1991. Silisin alkali ortamda çözünmesine etki eden faktörler, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Çimento Bülteni*, **28(286)**, 15-21.
- Yıldırım, S., 2002. Zeminlerin İncelenmesi ve Temel Tasarımı, Birsan Yayınevi, İstanbul, 438-453.
- Yılmaz, F., 2015. Tüfit taşların zemin stabilizasyonunda kireçle birlikte kullanılabilirliğinin standart deneyler ve tomografi tekniği ile araştırılması. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 160.
- Yılmaz, F. and Yurdakul M., 2017. Evaluating of marble dust for soil stabilization. *Acta Physica Polonica A*, **132**, 710-711.
- Yılmaz, F., Kamiloglu, H. A. and Sadoglu, E., 2015. Soil stabilization with using waste materials against freezing thawing effect. *Acta Physica Polonica A*, **128**, 392-394.