

## PERLİT İÇEREN GEOPOLİMER ZEMİNİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ

### GEOTECHNICAL PROPERTIES OF PERLITE CONTAINING GEOPOLYMER SOIL

Esmâ RAHAT\*<sup>1</sup>

Tuğba ESKİŞAR TEFCİ<sup>2</sup>

#### ABSTRACT

In this study, index and mechanical properties of perlite-geopolymer soils were investigated by performing a series of soil mechanics tests. Atterberg limits, compaction parameters and unconfined compressive strength developments of perlite-geopolymer soils were determined. Perlite was added to the samples 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 50% by the dry weight of the soil. The liquid limit and the plastic limit of perlite added soils decreased as the perlite content increased. The optimum water content and the maximum dry unit weight of the samples decreased by adding perlite at different rates to the soil. Sodium hydroxide was used as the liquid activator. The effect of different sodium hydroxide concentrations on perlite-geopolymer soil was also investigated. The increase in sodium hydroxide concentrations had a positive effect on the strength gain. The samples, which were cured for 7 days, reached strength levels exceeding 5 to 10 times of the unconfined compressive strength of the untreated soil. As a result, the application of perlite along with geopolymerization was effective in increasing the strength of the soil; the soil changed into a more rigid and stronger structure, and this process improved the mechanical properties of the soil drastically.

Keywords: Soil, Perlite, Geopolymer, Unconfined Compressive Strength

#### ÖZET

Bu çalışmada perlit-geopolimer zeminlerin indeks ve mekanik özellikleri bir dizi zemin mekaniği deneyleri ile incelenmiştir. Perlit-geopolimer zeminlerin Atterberg limitleri, kompaksiyon parametreleri ve serbest basınç dayanımı gelişimleri belirlenmiştir. Örneklere zeminin kuru ağırlığı üzerinden %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında perlit ilave edilmiştir. Perlit katkılı zeminlerin likit limiti ve plastik limiti, perlit içeriği arttıkça azalmıştır. Zemine farklı oranlarda perlit ilavesi ile numunelerin optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı azalmıştır. Likit aktivatör olarak sodyum hidroksit kullanılmıştır. Farklı sodyum hidroksit konsantrasyonlarının perlit-geopolimer zemini üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Sodyum hidroksit konsantrasyonlarındaki artışın dayanım kazanımına olumlu etkisi olmuştur. 7 gün küre tabi tutulan numuneler, işlem görmemiş zeminin serbest basınç dayanımının 5 ila 10 katını aşan dayanım seviyelerine ulaşmıştır. Sonuç olarak, geopolimerizasyon ile birlikte perlit uygulaması zeminin dayanımını arttırmada etkili olmuş; zemin daha rijit ve daha güçlü bir yapıya dönüşmüştür ve bu süreç zeminin mekanik özelliklerini büyük ölçüde iyileştirmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kil, Perlit, Geopolimer, Serbest Basınç Dayanımı

## 1. GİRİŞ

\*<sup>1</sup> Y. Lisans Öğrencisi, Ege Üniversitesi, [esma\\_rahata@hotmail.com](mailto:esma_rahata@hotmail.com)

<sup>2</sup> Doç. Dr., Ege Üniversitesi, [tugba.eskisar@ege.edu.tr](mailto:tugba.eskisar@ege.edu.tr)

Günümüzde yüzeysel zeminlerin iyileştirilmesi için çimento stabilizasyonu sıklıkla tercih edilmektedir. Çimentonun inşaat sektöründe kullanımı büyük miktarlarda CO<sub>2</sub> emisyonuna sebep olarak doğa için bir tehlike oluşturmaktadır. İklim ve çevre değişikliğinde çimentonun yarattığı büyük paya sahip karbon ayak izinin azaltılması için küresel girişimler yürütülmektedir (Kızıltan ve Doğan, 2021). Geoteknik sorunların çözümünde de karbon ayak izini azaltmak ve yeşil çözümlere odaklanması önemlidir. Bir alternatif çözüm olarak inşaat endüstrisinde geopolimerlerin kullanımları yaygınlaşmaktadır.

Konu, geoteknik mühendisliğinde yeni ele alınmaya başlandığından sınırlı sayıda literatür mevcuttur. Bunlardan öne çıkan bazılarına kısaca değinilmiştir. Davidovits (1989), geopolimerleri yapısal birimi AlO<sub>4</sub> ve SiO<sub>4</sub> tetrahedronlardan oluşan bir çeşit inorganik polimer olarak tanımlamaktadır. Geopolimerler, başka bir tanımla ortam sıcaklığı veya daha yüksek sıcaklıklarda alüminosilikat minerallerinin alkali aktivatör çözeltileri ile bir geopolimerizasyon reaksiyonuyla sentezlenen alüminosilikat çimento bağlayıcı malzemelerinin sınıfıdır (Davidovits, 1991; Duxson vd., 2007).

Swain (2015), çalışmada hem geopolimer bileşenlerinin hem de biyopolimer bileşenlerinin etkilerini incelemiştir. Sodyum bazlı likit aktivatörler ve katkı maddesi olarak uçucu kül geopolimer bileşenleri olarak, ayrıca zantan sakızı ve guar sakızını da biyopolimer bileşenleri olarak kullanılmıştır. Geopolimerin etkinliği, serbest basınç dayanımı açısından incelenmiştir. Serbest basınç dayanımı sonuçları açısından %40 uçucu kül ve %10 aktivatör eklenen zeminin daha yüksek dayanım verdiği görülmüştür. Geopolimerin biyopolimerden daha etkili olduğu da gözlenmiştir. Yılmaz ve Fidan (2018) bir geoteknik uygulama gerçekleştirmiş olup farklı yüzdelerde eklenen perlit örneğinin karışım örneklerindeki etkisini araştırmıştır. Killi zemin içerisine kireç ile birlikte farklı oranlarda (%0, %5, %10, %20, %25, %30) eklenen perlitin dayanım ve dayanıklılıkta pozitif bir etkisi olduğu saptanmıştır. Sukprasert vd. (2021), temel altı zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılmak üzere siltli kil bir zeminde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu tabanlı geopolimerin kullanımını deneysel olarak incelemişler ve NaOH konsantrasyonu ve kür sıcaklığı değiştirilerek üretilen örnekleri kıyaslamışlardır. Farklı oranlarda NaOH konsantrasyonu ile siltli kil, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu geopolimerlerinin 7 günlük serbest basınç dayanımlarının 50-80°C'lik kür sıcaklıklarıyla artmaya başladığını bulmuşlardır. Artan NaOH konsantrasyonu ile serbest basınç dayanımının arttığını ve N-A-S-H jelleri üreterek geopolimerin iç yapısını güçlendirmiş olduğunu saptamışlardır. Voottipruex vd. (2022), çalışması kapsamında perlite 2, 4, 6, 8, 10 ve 12 molar konsantrasyonlarında NaOH ekleyerek perlit içeren geopolimer örnekleri elde etmişlerdir. Perlit içeren geopolimer yumuşak kil ile kuru ağırlığının %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarıyla karıştırılmıştır ve elde edilen örnekler 25 ve 70°C'de 7, 14 ve 28 gün küre tabii tutulmuştur. Örneklerdeki NaOH miktarının ve kür süresinin artırılması ile serbest basınç dayanımlarında artış olduğunu saptamışlardır.

Bu çalışmada, perlitin farklı yüzde oranlarıyla kil zeminlere katılması ile ortaya çıkan indeks ve mekanik özelliklerindeki değişimleri gözlemlemek amaçlanmıştır. Öncelikle değişen perlit oranlarıyla kil zeminlerin Atterberg limitleri ve kompaksiyon parametrelerinin nasıl bir değişim gösterdiği incelenmiştir. Daha sonra perlit - geopolimer numunelerin dayanım gelişimini belirlemek için 7 günlük örnekler üzerinde serbest basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar detayları ile ele alınarak perlit ilavesinin olumlu yönde katkıları olduğu gösterilmiştir.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM

### 2.1. Malzemeler

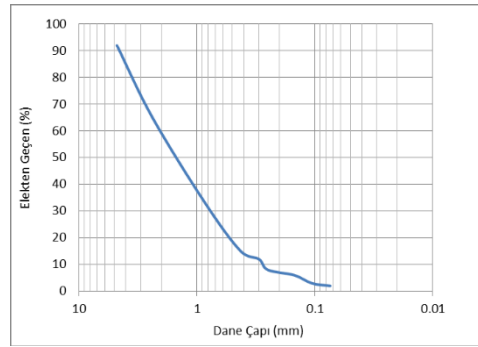
Deneylerde kil ve ağırlıkça farklı oranlarda (%0, %10, %20, %30, %40 ve %50) kil-perlit karışımli zeminlerle çalışılmıştır. Öncelikle kullanılan zeminin geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Mineralojisinin kaolinit kili olduğu kimyasal analizle belirlenen zeminin sınıfının düşük plastisiteli kil, sembolünün CL olduğu belirlenmiştir. Zemin örneğinin ve perlitin ASTM D4318 (2017) standardına uygun olarak belirlenen indeks özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan zeminlerin özellikleri

Geoteknik Özellik	Kaolinit Kili	Perlit
Grup Sembolü	CL	SW

Likit Limit (%)	32	-
Plastik Limit (%)	20	NP
Plastisite İndisi (%)	12	-
Özgül Ağırlığı ( $G_s$ -gr/cm <sup>3</sup> )	2.55	2.24

Ham perlit İzmir –Cumaovası'ndaki bir maden yatağından temin edilmiştir. XRF analizi sonuçlarına göre majör bileşikleri SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> olup sırası ile %73.5 ve %12.0 oranlarında mevcuttur. Ham perlitin gradasyon eğrisi ASTM D6913 (2017) standardına uygun olarak Şekil 1'de verilmiştir. Likit aktivatör olarak NaOH (sodyum hidroksit) kullanılmıştır. Sodyum hidroksit boncuk formda temin edilmiş olup beyaz renkte ve suda kolaylıkla çözünebilecek şekildedir; saflığı >%99'tür.



Şekil 1. Ham perlitin elek analizi

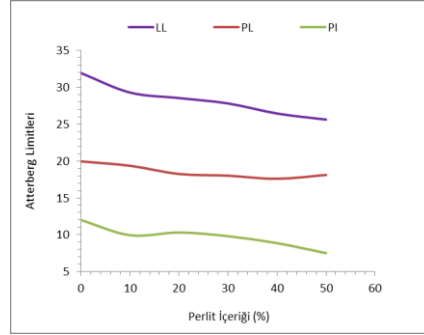
## 2.2. Laboratuvar Deneyleri

Atterberg limitleri belirlenirken ASTM D4318 (2017) standardına uygun olarak likit limit deneyleri ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Kil zeminin ve çeşitli kil-perlit karışımlarının likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Zeminlerin kompaksiyon parametrelerinin belirlenmesinde standart Proktor enerjisi ile çalışılmıştır. Kil zeminin, kil-perlit karışımlarının ve likit aktivatörlü kil-perlit karışımlarının optimum su/NaOH içerikleri ve buna karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlıkları bulunmuştur. Çalışma kapsamında, deney numuneleri optimum su/NaOH içeriğinde hazırlanmıştır (ASTM D698-12, 2021).

Serbest basınç dayanımı deneyleri için standart Proktor sıklığında, 5 cm çaplı ve 10 cm yüksekliğinde silindirik örnekler hazırlanmıştır. Zemin örnekleri hazırlanırken, deney programında belirlenen oranlar dikkate alınarak zemin ve perlit kuru şekilde eklenmiş, üzerine NaOH çözeltisi eklenerek homojen bir karışım elde edilmiştir. Hazırlanan zemin örneklerinin boyu ve çapı deney öncesinde kontrol edilmiştir. Her örnek grubu 20 ve 40°C'de küre tabi tutulmak üzere 3'er adet hazırlanmıştır. Zemin örnekleri 7 gün kür süresi ile oda sıcaklığı (20°C) ve yüksek sıcaklık (40°C) kür sıcaklığını tamamladıktan sonra serbest basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. ASTM D2166 (2016) standardına göre deneyler yapılmıştır. Örnekler 1.42 mm/dk hızla yüklenmiştir. Deneyler %10 deformasyon seviyesine kadar sürdürülmüştür.

## 3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

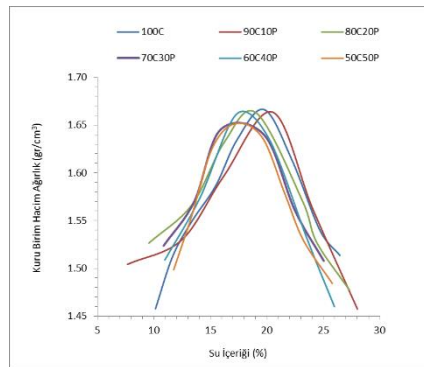
Kil-perlit karışımı zeminlerde likit limit (LL), plastik limit (PL) ve plastisite indisi (PI) üzerindeki etkisi Şekil 2'de gösterilmiştir. Kil zemine kuru zemin ağırlığının %10, %20, %30, %40 ve %50'si kadar perlit ilave edilmiştir. Eklenen perlit içeriği ile likit ve plastik limitte azalma olduğu görülmüştür. Likit limit ve plastik limitte azalma olduğu için plastisite indisinde azalmıştır.



Şekil 2. Kil-perlit karışımli zeminlerin kıvam limitleri

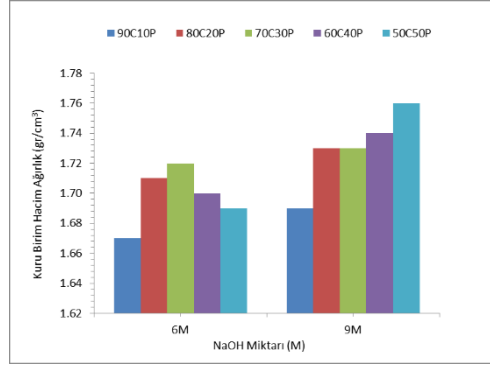
Zemin içerisine eklenen %10 perlit içeriğinde zeminin likit limit ve plastik limit değerleri sırasıyla 30 ve 19 bulunurken, %50 perlit içeriğinde zeminin likit limit ve plastik limit değerleri sırasıyla 26 ve 18 olarak bulunmuştur. Zemin içerisine %20 oranından sonra eklenen perlitin, zeminin plastik limitine etki etmediği ve işlenebilirliğinin aynı kaldığı saptanmıştır.

Şekil 3'te kil (C) zeminin ve %10, 20, 30, 40 ve 50 perlit (P) içeren zemin örneklerinin optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları gösterilmiştir. Kil zeminlerde perlit ilavesiyle zeminlerin optimum su içeriklerinde %0.5 ve %1 oranında azalma olduğu görülmüştür. Artan perlit miktarıyla kil zeminin kuru birim hacim ağırlıkları %10 perlit içeriğinde  $1.66 \text{ gr/cm}^3$  iken %50 perlit içeriğinde  $1.65 \text{ gr/cm}^3$  oranında azalma olduğu görülmüştür. Kil-perlit karışımı içerisine %20'den sonra eklenen perlit içeriğinden sonra maksimum kuru birim hacim ağırlığında değişim olmadığı görülmüştür. Zemin içerisine %10 perlit eklendikten sonra maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği sırasıyla  $1.66 \text{ gr/cm}^3$  ve %20 olurken, %50 perlit içeriğinde  $1.65 \text{ gr/cm}^3$  ve %17.5 olduğu saptanmıştır. Perlit-geopolimer zeminlere NaOH'ın 6M ve 9M konsantrasyonlarında ilavesiyle zeminlerin optimum NaOH içerikleri %1 oranlarında azalırken kuru birim hacim ağırlıkları %1 ila %4 oranlarına kadar artış göstermiştir.



Şekil 3. Kil-perlit karışımı zeminlerin kompaksiyon eğrileri

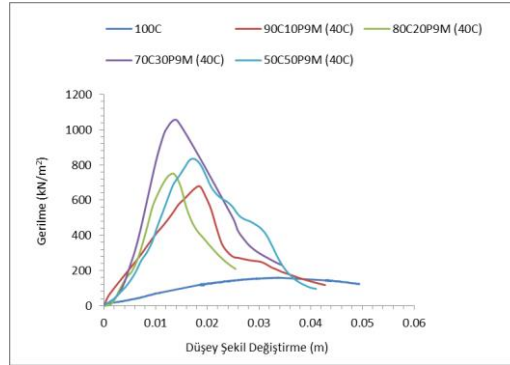
Şekil 4'te perlit-geopolimer zeminlerin maksimum kuru birim hacim ağırlık-NaOH miktarına ait grafikler verilmiştir. Elde edilen bulgulara göre likit aktivatör oranının 6M'dan 9M'a artırılması ve perlit içeriğinin artmasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlıkta artış olduğu gözlemlenmiştir. Deney örneklerinden, 90C10P6M (%90Kil\_%10Perlit\_6M NaOH)'da maksimum kuru birim hacim ağırlık  $1.67 \text{ gr/cm}^3$  elde edilirken, 90C10P9M'da maksimum kuru birim hacim ağırlık  $1.69 \text{ gr/cm}^3$  ve 50C50P6M'da maksimum kuru birim hacim ağırlık  $1.69 \text{ gr/cm}^3$  elde edilirken, 50C50P9M'da maksimum kuru birim hacim ağırlık  $1.76 \text{ gr/cm}^3$  olarak elde edilmiştir. Buna göre kil zeminlere perlit eklendikçe kuru birim hacim ağırlıkları azalırken optimum su içeriklerinin de azaldığı ve perlit – geopolimer karışımlara perlit ve NaOH eklendikçe kuru birim hacim ağırlıkları artarken optimum NaOH içeriklerinin azaldığı sonucuna varılmıştır.



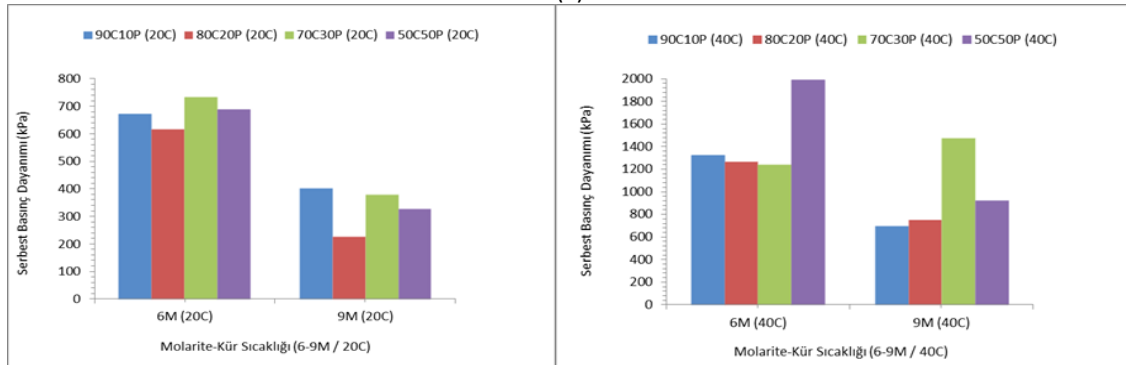
Şekil 4. Perlit - geopolimer kil zeminlerin farklı likit aktivatör içeriğindeki kuru birim hacim ağırlık değerleri

Şekil 5a, b ve c'de 7 gün kür süresi boyunca oda sıcaklığı (20°C) ve yüksek sıcaklık (40°C) altında küre tabii tutulmuş perlit - geopolimer zeminlerin ölçülen serbest basınç dayanımları gösterilmiştir. Şekil 5a'da sunulan gerilme-düşey şekil değiştirme eğrileri 9M NaOH içeren 40°C'de 7 gün küre tabii tutulan örneklerden bir seçkiyi içermektedir. Şekil 5a'da görüldüğü üzere gerilme -düşey şekil değiştirme ilişkisinde 70C30P9M (40°C) örnekleri ortalaması diğer grup örneklerine göre daha gevrek davranmaktadır. En yüksek serbest basınç dayanımı değeri incelenen grup içerisindeki en küçük düşey şekil değiştirme değeri eşlik etmektedir. 90C10P9M (40°C) örnekleri ise işlem görmemiş zemin örneklerinin ardından işlem gördüğü halde en sünek davranışı gösteren grubu oluşturmaktadır.

Şekil 5b ve c'de oda sıcaklığında (20°C) ve yüksek sıcaklıkta (40°C) 7 gün bekletilen örneklerle ait serbest basınç dayanımları verilmiştir; çalışmada dikkate alınan 6M-9M NaOH konsantrasyonlarının etkisi de görülmektedir.



(a)



(b)

(c)

Şekil 5. (a) 7 gün boyunca 40°C küre tabi tutulan bazı örneklerin gerilme-düşey şekil değiştirme davranışları, (b) 20°C ve (c) 40°C kür sıcaklığına maruz kalan örneklerin ölçülen serbest basınç dayanımları

Perlit-geopolimer zeminlerde kür sıcaklığının artmasıyla zeminlerin serbest basınç dayanımları artmıştır. İşlem görmemiş zemin örneğinin serbest basınç dayanımı 160.22 kPa iken perlit-geopolimer zemin karışımlarından 50C50P6M örnekleri 40°C altında küre tabi tutuldukları takdirde 7 gün sonunda serbest basınç dayanımlarının 1987.50 kPa'a ulaştığı saptanmıştır. Kil-perlit karışımı zeminler içerisine 9M NaOH eklenmesinin serbest basınç dayanımında artışa katkı sağlamadığı, en yüksek serbest basınç dayanımını 6M NaOH konsantrasyonlarında elde edildiği bulunmuştur. Böylece çalışmanın devamında daha düşük molaritede NaOH kullanılarak sağlanacak geoteknik çözümlerin de daha ekonomik olması mümkün olacaktır. Çalışma tamamlandığında bir maliyet analizinin yapılması planlanmaktadır.

#### 4.SONUÇLAR

Bu çalışmada perlit - geopolimer zeminlerin Atterberg limitleri, kompaksiyon özellikleri ve serbest basınç dayanımları incelenmiştir. Sonuçlar, perlit - geopolimer zeminlerin indeks ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.

- %10 kil-perlit karışımı zeminde en yüksek likit limit ve plastik limit değerlerinin elde edilmesi, bu yüzde değerinden sonra perlit ilavesinin likit limit ve plastik limit değerlerinin azalmasında etkili olmuştur.
- Kil-perlit karışımı zeminlerde, perlit oranı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği azalmıştır.
- Perlit-geopolimer zeminlerin, maksimum kuru birim hacim ağırlıkları artarken, optimum su içeriği (NaOH katkılı) değeri azalmıştır.
- Perlit içeren geopolimer zeminlere ait serbest basınç dayanımlarında en yüksek değer 50C50P6M örneklerinin yüksek sıcaklıkta (40°C) küre tabi tutulması ile elde edilmiştir. Bu çalışmada bulunan bulgular ile Voottipruex vd. (2022) ile uyumludur. Voottipruex vd. (2022), örneklerde kullanılan likit aktivatörün molaritesinin 6-10 molar arasında tutulmasını önermiş ve oda sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda kür uygulamasını tavsiye etmiştir.
- Perlit içeren zeminlere geopolimerizasyon amaçlı 6M-9M NaOH eklenmesi ve ardından yüksek sıcaklık (40°C) altında kür uygulanması zeminin serbest basınç dayanımını arttırmıştır. 50C50P6M örneklerinde zeminin serbest basınç dayanımında %100 artış gözlenmiştir. Bu bulgular önderliğinde çalışmanın devam eden kısmında perlit – geopolimer zeminlerin içsel sürtünme açısı, kohezyonu, sıkışma indisi gibi kayma mukavemeti ve sıkışma özellikleri de araştırılacaktır. Bu ön çalışmanın çıktıları doğrultusunda perlit - geopolimer zeminlerin kullanımının ulaşılacak dayanım değerleri açısından başarılı sonuçlar vereceği öngörülmektedir.

#### KAYNAKLAR

- ASTM D698-12. (2021), "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>))", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2166. (2016), "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D6913. (2017), "Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4318. (2017), "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Davidovits, J. (1989), "Geopolymers and Geopolymeric Materials" Journal of Thermal Analysis 35, 429–441 (1989).
- Davidovits, J. (1991), "Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials" J Therm Anal 37:1633–1656

- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A., Van Deventer, J.S.J. (2007), "Geopolymer Technology: The Current State of The Art". J Mater Sci 42:2917–2933
- Kızıltan, B., Umut Doğan, D. (2021), "Çimento Sektöründe Karbon Ayak İzlerinin Raporlanması Amacıyla Bir Çerçeve Önerisi", Çağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi , 18 (1) , 40-58
- Sukprasert, S., Hoy, M., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Rashid, A. S. A., and Nazir, R. (2021), "Fly Ash Based Geopolymer Stabilisation of Silty Clay/Blast Furnace Slag For Subgrade Applications", Road Materials and Pavement Design, 22(2), 357-371.
- Swain, K. (2015), "Stabilization of Soil Using Geopolymer and Biopolymer", National Institute of Technology Rourkela
- Voottipruex, P., Teerawattanasuk, C., Sramoon, W., Meepon, I., (2022), "Stabilization of Soft Clay Using Perlite Geopolymer Activated By Sodium Hydroxide" , International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 8(1), 5.
- Yılmaz, F., ve Fidan, D. (2018), "Influence of Freeze-Thaw on Strength of Clayey Soil Stabilized with Lime and Perlite", Geomechanics & engineering,14(3),301-306.