



ZEMİNLERDE TEK FAZLI GEOPOLİMERİZASYON UYGULAMASI VE GEOPOLİMERİZASYONUN SERBEST BASINÇ MUKAVEMETİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

¹Tuğba ESKİŞAR , ²Gizem AKSU 

Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35100, İzmir, TÜRKİYE
¹tugba.eskisar@ege.edu.tr, ²91170001103@ogrenci.ege.edu.tr

(Geliş/Received: 27.08.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 22.01.2020)

ÖZ: Bu çalışmada likit aktivatörler ile yapılan tek fazlı geopolimerizasyon sonucu kil, killi kum, kum zeminlerde gözlenen mukavemet değişimleri incelenmiştir. Örnek grupları deney planına uygun olarak 7 günden 90 güne değişen sürelerde küre tabi tutulmuştur. Geopolimerizasyon metodunun, aktivatör içeriğinin ve oranlarının, kür sürelerinin ve donma-çözünme çevrimlerinin serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Farklı likit aktivatör içeriklerinin başarısının, zeminin türü ve geopolimerizasyon metodundan önemli ölçüde etkilendiği bulunmuştur. Kum ve killi kum örneklerinde optimum su içeriği kadar likit aktivatör kullanılması iyileştirme sağlarken, kil zemin örneklerinde optimum su içeriğinin yaklaşık iki katı kadar likit aktivatör kullanılması mukavemeti artırmaktadır. Mukavemet ayrıca kür süresinin uzaması ile artmaktadır. İşlem görmeyen kil zeminin mukavemeti 315 kPa iken 90 gün sonunda aynı zemin örnekleri 1114 kPa mukavemete ulaşmıştır. Donma-çözünme çevrimleri uygulanan zeminlerde ise belirgin bir mukavemet azalımı görülmüştür. En fazla mukavemet kaybı yine kil zeminlerde gözlemlenmiş ve 3 çevrim sonunda mukavemet %55 kadar azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kil, Killi kum, Kum, Aktivatör, Serbest basınç mukavemeti.

A Single Phase Geopolymerization Application In Soils And The Effect Of Geopolymerization On The Unconfined Compressive Strength

ABSTRACT: In this study, single phase geopolymerization with liquid activators were applied to clay, clayey sand and sand soils and unconfined compressive strength developments due to this process was investigated. The samples were subjected to curing times varying between 7 and 90 days of curing in accordance with the experimental programme. The effects of geopolymerization method, activator content and rate, curing time and of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of the soils were determined. It has been found that the success of different liquid activator contents is significantly affected by the type of soil and geopolymerization method. It was sufficient to treat sand and clayey sand samples with liquid activator amounts that are equal to the optimum water contents of the soils, while the use of liquid activator approximately twice the optimum water content in clay soil samples was necessary to increase the strength. The increase in the curing times also increased the strength of the samples. While the untreated clay samples had an unconfined compressive strength of 315 kPa, after 90 days of curing, 1114 kPa strength was observed. The application of freeze-thaw cycles decreased the strength of the soils. Major loss of strength was observed in clay soils with a decrease of %55 strength.

Key Words: Clay, Clayey sand, Sand, Activator, Unconfined compressive strength

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde artan çevre sorunlarıyla birlikte mühendislik açısından doğa dostu yeşil çözümler üretilmesi sıklıkla gündeme gelmektedir. Geopolimer bilimindeki gelişmeler doğayı koruyan çözümlerin

üretilmesine katkıda bulunmaktadır (Uddin ve Saraswathy, 2018). Geoteknik mühendisliği uygulamalarında da geopolimerlerden zemin iyileştirmesi alanında yararlanmak mümkündür. Yıllardır geopolimerin performansı birçok alanda araştırmacılar tarafından değerlendirilmiş ve test edilmiştir. İleri araştırmalar geopolimerin yapı ve geoteknik bilimlerini içeren inşaat mühendisliği çalışmalarında uygulanmasının iyi bir sonuç verdiğini göstermiştir (Abdullah ve diğ., 2015).

Geopolimerler zemin iyileştirmesinde bir stabilizasyon malzemesi olarak kullanılan çimento yerine geçebilecek etkidedir. Bu yenilikçi ürün çimento oranla çok daha düşük karbon ayak izine sahip olup çimento üretimi sırasında yüksek oranda salınan karbondioksiti de bertaraf etmektedir (Zhang ve diğ., 2013; Adhikari ve diğ., 2018).

Phetchuay ve diğ., (2016), kil zemin ile kalsiyum karbür kalıntısı ve uçucu kül bazlı bir geopolimer oluşturarak kilin mukavemetinin gelişimini ve karbon ayak izini araştırmışlardır. Kullanılan sıvı alkali aktivatör, sodyum silikat çözeltisi (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) karışımıdır. Kil zeminin mukavemetinin, uçucu kül içeriğine ve NaOH konsantrasyonuna bağlı olduğu bulunmuştur. Geopolimer uygulaması yapılan zeminlerin karbon ayak izleri çimento ile stabilize edilmiş zeminlerden %22-%43 aralığında daha düşüktür.

Killi zemin, sodyum silikat eklenmesiyle iyileştirilme potansiyeline sahiptir. Moayed ve diğ. (2011), tarafından yapılan bir çalışmada, kaolinit kili kullanılarak sodyum silikat ile stabilizasyon uygulaması yapılmıştır. Bu çalışmada 5 mol/L sodyum silikatın eklenmesi, en yüksek serbest basınç mukavemeti sonuçlarını vermiştir.

Swain (2015), çalışmasında hem geopolimer bileşenlerinin hem de biyopolimer bileşenlerinin etkilerini incelemiştir. Sodyum bazlı alkali aktivatörler ve katkı maddesi olarak uçucu kül geopolimer bileşenleri olarak, ayrıca zantan sakızı ve guar sakızı da biyopolimer bileşenleri olarak kullanılmıştır. Geopolimerin etkinliği, serbest basınç mukavemeti açısından incelenmiştir. Serbest basınç mukavemeti sonuçları için %40 uçucu kül ve %10 aktivatör eklenen zeminin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Geopolimerin stabilizasyon açısından biyopolimerden daha etkili olduğu da gözlenmiştir.

Ghadir ve Ranjbar (2018), volkanik kül bazlı geopolimer ve normal portland çimentosu kullanarak killi zemin stabilizasyonunun mekanik performansını karşılaştırmışlardır. Sertleşme koşullarının ve zamanın, alkali aktivatör / kil ve alkali aktivatörün molaritesi ve volkanik kül / kil oranının etkileri belirlenmiştir. İşlem görmemiş killi zemin örneklerinin basınç mukavemeti, ıslak ve kuru koşullarda, zemin bağlayıcıların %15'i ile yer değiştirdiğinde, sırasıyla 0,2MPa'dan 4MPa'a ve 2,0 MPa'dan 12MPa'a yükselmiştir. Portland çimentosunun ıslak koşullarda başarı ile uygulanabildiği, geopolimer işleminin kuru koşullarda daha verimli olduğu gözlenmiştir. Alkali aktivatör ve alkali aktivatör / kil molaritesinin artırılması, geopolimerle iyileştirilmiş zeminin serbest basınç mukavemetini arttırmıştır. Ayrıca, tüm geopolimer örneklerinde daha yüksek enerji emilimi gözlenmesi, bu malzemenin normal portland çimentosundan daha sünek bir malzeme olduğunun kanıtı olarak sunulmuştur.

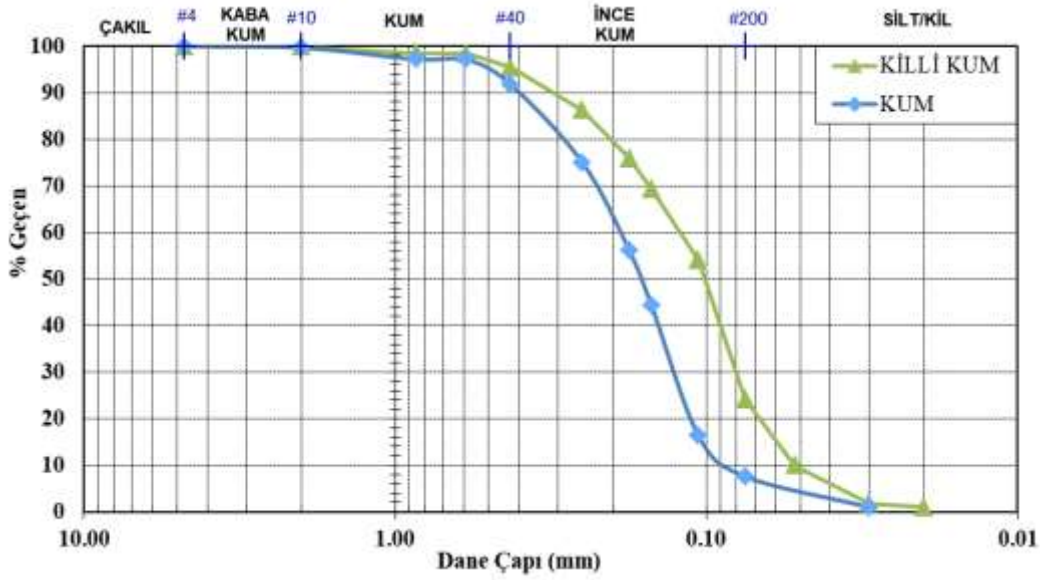
Ayyappan ve diğ. (2017), yumuşak kil ve kum karışımlarında geopolimerin, yüksek mukavemet, düşük maliyet, düşük enerji tüketimi ve düşük CO_2 emisyonları ile umut verici bir alternatif olduğunu belirtmektedir. (%2 ve %4) metakaolin bazlı geopolimer ile stabilize edilmiş killi zemin örneklerinde serbest basınç mukavemeti artmış ve bu yöntemin etkili bir zemin iyileştirme yöntemi olabileceği gösterilmiştir.

Bu çalışmada kil, killi kum ve kum örnekler üzerinde tek fazlı bir geopolimerizasyon uygulaması yapılmıştır. Literatür incelemesinden anlaşıldığı üzere killi kum ve kum zeminler ile yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu sebeple bu çalışmada kil zeminler ile birlikte killi kum ve kumun geopolimerizasyonu da dikkate alınmıştır. Likit aktivatör olarak iki farklı oranda cam suyu (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) solüsyonu kullanılmıştır. Ek bir prekürsör kullanılmadan sadece likit aktivatör kullanılarak bir iyileştirme çalışması yapılmıştır. Geopolimerizasyon sürecinde sıcaklıkların değişken olduğu iki farklı metot denenmiştir. Bu metotlar dahilinde kür süresi etkisi, NaOH molaritesinin etkisi ve donma-çözünme etkisi incelenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Zeminlerin Geoteknik Özellikleri (Geotechnical Properties of Soils)

Çalışmada kullanılan kil Çanakkale merkezli üretim yapan bir tesisden temin edilmiş olup kilin türünün kaolinit olduğu kimyasal analiz sonucu belirlenmiştir. Kum zemin, İzmir'deki bir inşaatın temel çalışması esnasındaki kazıdan elde edilmiştir. Killi kum olarak nitelendirilen zemin ise bu iki zeminin karışımı ile oluşturulmuştur. Bu zeminde kil oranı %45, kum oranı ise %55'dir. Elek analizi sonucunda kum malzemenin %90'ından fazlasının kum-ince kum boyutunda olduğu, killi kumun ise %75'inin kum-ince kum boyutunda olduğu görülmektedir (Şekil 1). Kum ve killi kum zeminin sınıflandırılması ASTM D2487'ye (2017) uygun olarak birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre yapılmıştır. Kum zeminin USCS zemin sınıfı sembolü SP-SM olarak bulunmuştur. Tüm zeminlerin indeks özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Kum İle Killi Kum Zeminlerin Gradasyon Eğrileri

Figure 1. Granulometry curves of sand and clayey sand soils

Çizelge 1. Zeminlerin İndeks Özellikleri

Table 1. Index properties of soils

Özellik Adı	KUM	KİLLİ KUM	KİL
Likit Limit (%)	-	27	48
Plastik Limit (%)	-	16	20
Plastisite İndisi (%)	NP	11	28
D ₁₀ (mm)	0,09	0,05	-
D ₃₀ (mm)	0,13	0,08	-
D ₆₀ (mm)	0,19	0,12	-
Cu	2,11	2,4	-
Cc	0,99	1,07	-
USCS Sembolü	SP-SM	SC	CL
Zeminin Tanımı	Silt içeren kötü derecelenmiş kum	Killi kum	Düşük plastisiteli kil

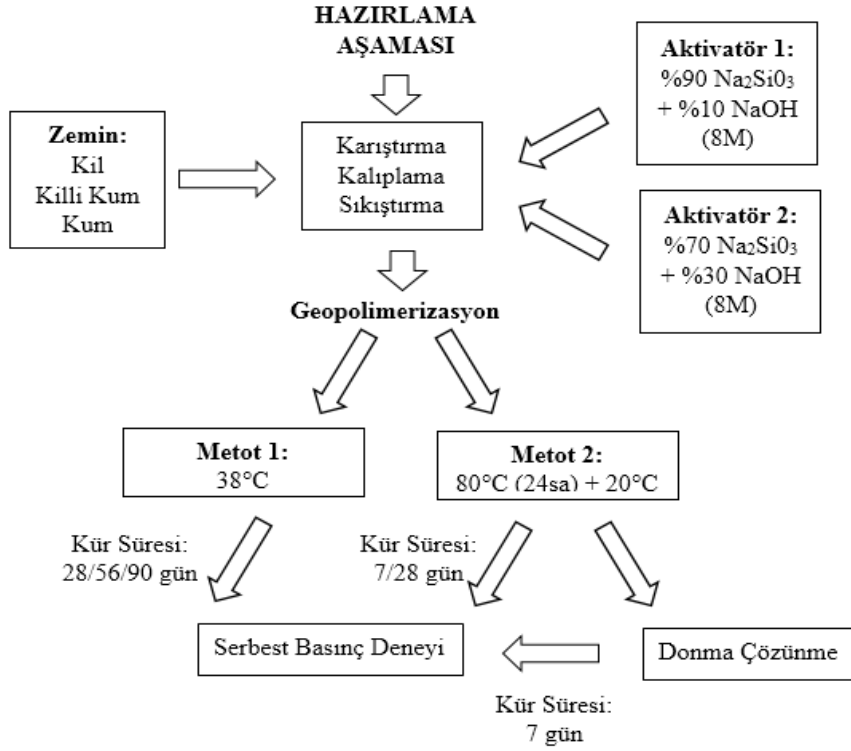
DeneySEL Çalışmada Kullanılan Malzemeler (Materials Used in The Experimental Studies)

Geopolimerizasyonu gerçekleştirebilmek için sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksitten (NaOH) faydalanılmıştır. Çalışmaya uygun molaritedeki sodyum hidroksit çözeltisi çeşitli ön deneyler sonucunda belirlenmiş olup 8 mol olarak kullanımına karar verilmiştir. İlerleyen bölümlerde yapılan bu seçimin detayları açıklanmıştır. Geopolimerizasyon işlemi örneklere bir kez uygulanmıştır, herhangi bir ikincil işlem yapılmamıştır. Bu sebeple yapılan bu uygulama tek fazlı geopolimerizasyon sınıfına girmektedir. Sodyum silikat ve suda çözülmüş sodyum hidroksit bileşimi olan solüsyon uygulandığı ortamda kimyasal reaksiyonları tetiklediği için aktivatör görevi görmektedir. Ancak seçilen aktivatörün içeriği uygulamanın başarısını değiştirecek özelliktedir. Bu nedenle iki farklı aktivatör içeriği ile çalışılarak elde edilen sonuçlardan söz konusu zeminler için en uygun aktivatör içeriği belirlenmiştir. Burada % cinsinden verilen miktarlar sıvı karışım içindeki ağırlıkça oranı temsil etmektedir:

Aktivatör 1: %90 sodyum silikat - %10 sodyum hidroksit (Grafiklerde 9010 şeklinde gösterilmiştir.) ve Aktivatör 2: %70 sodyum silikat - %30 sodyum hidroksittir (Grafiklerde 7030 şeklinde gösterilmiştir.). Her iki aktivatör, çalışma öncesinde büyük miktarlarda hazırlanmış ve büyük cam bidonlar içinde hava almayacak şekilde, gün ışığı ve sıcaklık değişiminden etkilenmeyecekleri bir ortamda muhafaza edilmişlerdir. Böylece örnek hazırlanması sırasında aktivatör içeriklerinin her zaman aynı kaynaktan gelmesi sağlanmıştır.

Çalışma kapsamında hava sıcaklığının geopolimerizasyon metodu üzerindeki etkileri bu 2 aktivatör uygulanarak dikkate alınmıştır (Çizelge 2). Geopolimerler, 100°C'nin altındaki sıcaklıklarda sertleşen, dayanıklı bağlayıcı özellikli malzemeler grubuna aittir (Rovnanik, 2010). Temel olarak 38°C ve 20°C sıcaklıkların etkisinin araştırılması düşünülmüştür. Ön deneylerle, sadece 20°C'de kürleme işleminin likit aktivatörün etkinliğini göstermede yetersiz olacağı tespit edilmiştir. Bu sebeple iki farklı geopolimerizasyon uygulaması yapılmasına karar verilmiştir. Metot 1'de örnekler direkt özel olarak teşkil edilmiş 38°C sıcaklığındaki bir kür odasında saklanmışlardır. Metot 2'de ise öncelikle örnekler 24 saat boyunca 80°C'lik bir etüvde bekletilmişlerdir, ardından kür süresi boyunca 20°C sıcaklıktaki (%95 r.n.) bir kür odasında saklanmışlardır. 24 saat 80°C'lik etüvde bekletmenin kimyasal reaksiyonları tetikleyici bir görevi vardır (Alshaaer, 2013; Morsy ve diğ., 2014).

Şekil 2'de örneklerin hazırlanma aşamasından mukavemet ölçümlerinin yapılmasına kadar olan çeşitli deney süreçleri bir şema halinde özetlenmektedir.

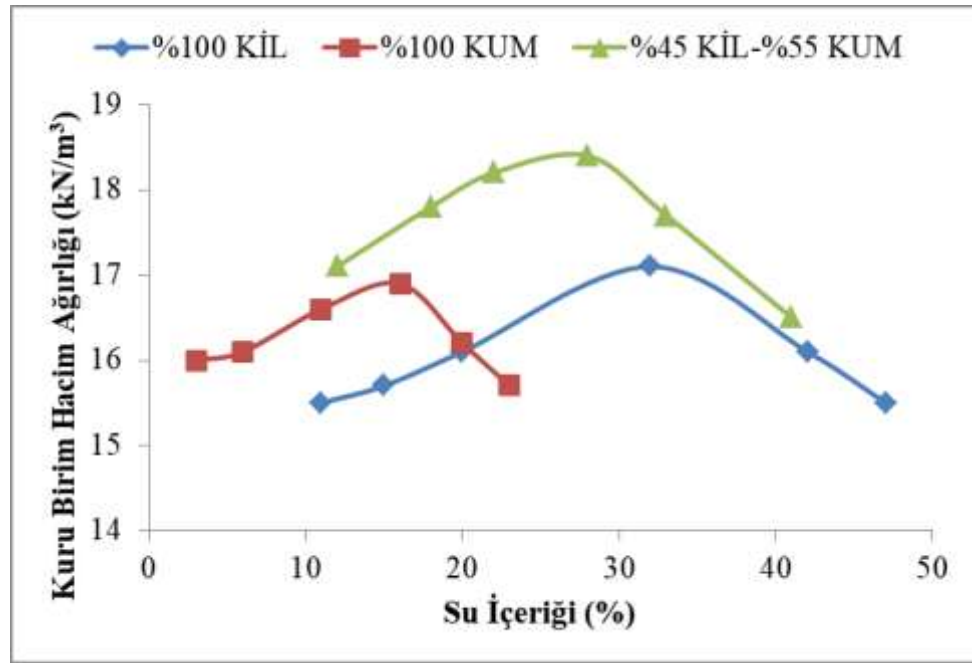


Şekil 2. Geopolimer Örneklerinin Hazırlanması ve Deneysel Aşamaları
Figure 2. Preparation of geopolymer samples and the experiment stages

Örneklerin Hazırlanması (Preparation of The Samples)

Örneklerin proktor sıklığında hazırlanması planlanmıştır. Bu amaçla öncelikle örneklerde kullanılacak optimum su içeriğini belirlemek amacıyla kil, kum ve killi kum karışımı örnekler standart Proktor enerjisi ile sıkıştırılmış ve kompaksiyon eğrileri elde edilmiştir (Şekil 3). Kompaksiyon deneyleri ASTM D698'e (2012) uygun olarak yapılmıştır. Aktivatör 1 veya 2'nin zemine, zeminin optimum su içeriği kadar eklenmesi planlanmıştır.

Kilin optimum su içeriği %32, kumun optimum su içeriği %16, killi kum zeminin optimum su içeriği %28 bulunmuştur. Sırasıyla bu zeminlerin kuru birim hacim ağırlıkları 17,10 kN/m³, 16,90 kN/m³, 18,40 kN/m³ olarak bulunmuştur. Kil zemin ve kum zeminle kıyaslandığında killi kum zeminin homojen karışımı sonucu en yüksek kuru birim hacim ağırlığı ulaşılmaktadır. Burada kil danelerinin kum danelerinin boşluklarındaki yerleri doldurmasının önemli bir etkisi olmaktadır. Böylece çok daha yoğun bir zemin matrisi oluşabilmektedir. Aynı zamanda bu zemin, kil zemin ile kum zemin arasında kalan bir optimum su içeriğine sahiptir. Kum zeminin gerek maksimum kuru birim hacim ağırlığı gerekse optimum su içeriği diğer zeminlere kıyasla daha düşüktür. Bu durum plastik özelliği olmayan bir zeminle uyumlu bir sonucu işaret etmektedir (Holtz ve Kovacs, 1981).



Şekil 3. Kil, Killi Kum ve Kum Zeminlerin Kompaksiyon Eğrileri

Figure 3. Compaction curves of clay, clayey sand and sand soils

Örneklerin hazırlanması sırasında, öncelikle zemin ile optimum su içeriğine eşit miktarda aktivatörün homojen karışımı sağlanmıştır. Ardından Standart Proktor sıkılığında üç tabaka halinde sıkıştırma gerçekleştirilmiştir. 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde örnekler hazırlanmıştır. İstemeyen dış etmenlerden korumak amacıyla örnekler LLDPE film ile sarılmıştır.

Örnek isimlerinin birbirine karışmasına engel olmak için kil zemin (C), kum zemin (S), killi kum zemin (CS) harfleri ile kodlanarak ifade edilmiştir. Aynı kodlama, makale içinde de bulgu ve sonuçların irdelendiği ilgili şekil ve tablolarda da kullanılmıştır.

Yöntem (Method)

Çalışma kapsamında hazırlanan örnekler kür süresi sonunda ya direkt ya da donma-çözünme çevrimlerini tamamladıktan sonra tek eksenli serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Serbest basınç deneyleri ASTM D2166'ya (2016) uygun olarak yapılmıştır. Uygulanan yükün %1/dk kadar eksenel şekil değiştirme oluşturmaya dikkat edilmiştir. Deneylerin 15 dakikanın altında tamamlanmasına dikkat edilmiştir. Tüm deneyler bir veri toplama ünitesince kayıt altına alınmış ve en büyük mukavemet değeri gözlemlendikten sonra yüklemeye devam edilerek mukavemet değerlerinin düşüşü de takip edilmiştir. Şekil değiştirme miktarının en fazla %15 olmasına dikkat edilmiştir.

Donma-çözünme deneylerinde kapalı sistem kullanılmıştır. Bu sistemin avantajı donma sırasında zeminin boşluk oranı değişimini ve çözünme sırasında dışarıdan şişme potansiyeli olan zeminlerin su alımını sınırlandırmasıdır. Zeminde göreceli olarak daha küçük örneklerle çalışıldığından bu sistemin kullanılması örneğin içerisinde sıcaklık dağılımının kontrollü bir biçimde oluşmasını sağlar (Wong ve Haug, 1991). Konrad ve Samson (2000), kapalı sistemle hazırlanan örneklerin arazi şartlarını temsil etmede daha başarılı olduğunu göstermiştir. Kür süresini tamamlayan örnekler -18°C sıcaklığa kadar dondurulmuştur. Bu işlem 24 saat sürmüştür. Ardından 20°C'de çözünme işlemine tabi tutulmuşlardır. Bu işlem de 24 saat sürmüştür. Toplamda 48 saat olan bu işlemler 1 donma-çözünme çevrimi olarak belirlenmiştir (ASTM D560). Zeminlerin maruz kalacakları yıllık donma-çözünme çevrim sayısı Binal vd. (1997) tarafından İzmir için 1 ile 5 çevrim olarak saptanmıştır. Çalışmada bu değerlerin ortalaması alınarak her örnek 3 çevrime bırakılmıştır. Son çözünme işleminden sonra serbest basınç deneyine tabi tutularak örnekte oluşan deformasyon ve eksenel yük verileri kaydedilmiştir. Kaydedilen bu veri daha sonra aynı

grupta yer alan fakat donma-çözünme işlemine girmemiş örneklerle karşılaştırılarak örnekte oluşan dayanım kaybı ile ilgili sonuçlar elde edilmiştir.

BULGULAR VE SONUÇLARIN İRDELENMESİ (RESULTS AND DISCUSSIONS)

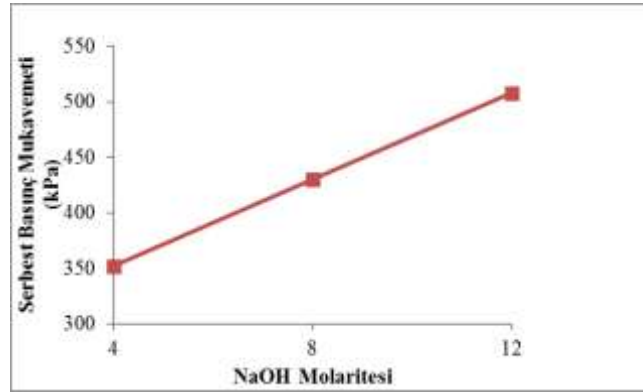
Bu çalışmada kil, killi kum ve kum zeminlerde iki farklı metot ile tek fazlı geopolimerizasyon uygulaması yapılmıştır. Aynı içeriği (Na_2SiO_3 ve NaOH) farklı oranlarda bulunduran iki adet aktivatör kullanılmıştır. Böylece hangi aktivatör solüsyonunun hangi geopolimerizasyon metoduna daha uygun olduğu belirlenmiştir.

Kimyasal reaksiyonlar geopolimerizasyonda ortam sıcaklığından etkilenir (Rovnanik, 2010; Heah ve diğ., 2011). Geopolimerizasyonu tetiklemek için iki metot düşünülmüştür. Bunlardan birincisinde (metot 1) örnekler kür süreleri boyunca özel tasarlanmış 38°C sıcaklıkta bir odada bekletilmiştir. İkinci yaklaşımda (metot 2) ise örnekler 1 gün boyunca 80°C sıcaklıkta bir etüvde bekletilerek ardından 20°C (%95 r.n.) sıcaklıktaki kür odasında küre bırakılmıştır (Alshaaer, 2013; Bing-hui ve diğ., 2014). Kür süresinin gün bazında sayımı örnekler etüvden çıktıktan sonra olmuştur. Her iki geopolimerizasyon şeklinin serbest basınç mukavemetleri açısından karşılaştırması yapılmıştır. Bunun dışında bir grup örneğe donma-çözünme deneyi 3 çevrim halinde uygulanarak serbest basınç mukavemeti değişimleri incelenmiştir.

Bu bölüm, NaOH molaritesinin etkisini, sıcaklık etkisini, aktivatör içeriği etkisini, aktivatör 1'in zeminin optimum su içeriğinden farklı bir miktarda kullanılması sonucu gelişen etkiyi, kür süresinin etkisini ve 3 çevrim donma-çözünmenin etkisini serbest basınç mukavemeti cinsinden incelemektedir.

Likit Aktivatör İçindeki NaOH Molaritesinin Etkisi (Effect of NaOH Molarity in Liquid Activator)

Sodyum hidroksit (NaOH), bu çalışma içindeki maliyetler düşünüldüğünde en pahalı olan malzemedir. Bu sebeple, optimum miktarda kullanılması gerçek arazi uygulamalarında en ekonomik koşulun tercih edilmesi açısından önem arz etmektedir. Aktivatör 1, sadece %10 NaOH içerdiğinden bu aktivatörle hazırlanan örneklerde optimum molaritenin bulunması en ekonomik çözümü sağlayacaktır. Zemin örnekleri 4, 8 ve 12 mol NaOH içeren aktivatör 1 ile işleme tabi tutulmuş ve 28 günlük kür sürelerini tamamlamalarının ardından serbest basınç mukavemetleri ölçülmüştür. Tüm örnekler benzer eğilimi gösterdiği için bir örnek olarak Şekil 4'te kil zeminlerde molaritenin etkisi sunulmuştur. Molaritenin artmasıyla zeminlerin serbest basınç mukavemetleri artmıştır. Bu sebeple NaOH , 4 mol iken serbest basınç mukavemeti en küçüktür. Oysa, aktivatör içindeki NaOH 8 molde 12 mole çıkarıldığında serbest basınç mukavemeti %15 artmaktadır. Diğer örnek gruplarında da artış %10-%15 mertebesindedir. Ancak, NaOH molaritesinin artması iyileştirme projesinin maliyetlerinin de artması anlamına gelmektedir. Bu sebeple 8 mol NaOH kullanımı tercih edilmiştir (Somna ve diğ., 2011; Palanisamy ve Suresh Kumar, 2018).



Şekil 4. C9010 Örneklerinde NaOH Molaritesinin Etkisi
Figure 4. Effect of NaOH molarity on C9010 samples

Sıcaklık Etkisi - Metot 1 ile Geopolimerizasyon (Temperature Effect – Geopolimerization with Method 1)

Çizelge 2’de kil (C), killi kum (CS) ve kum (S) örneklerin aktivatör 1 ve 2 ile hazırlanarak 38°C sıcaklıkta 28, 56 ve 90 gün küre tabi tutulduktan sonraki serbest basınç mukavemeti değerleri özetlenmektedir. Çalışmada 28 gün üzerinden metot 1 ve metot 2 arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Metot 1 uygulaması yaz sıcaklığına uygun bir derecede olduğundan sahada uygulanması kolay bir yol izlediği için, daha uzun dönem mukavemetlerin incelenmesi bu metot ile yapılmıştır.

Aktivatör 1’in zeminin optimum su içeriğinde eklendiği örneklerde 28 günde daha büyük mukavemet değerleri elde edilmiş olup, kil zeminlerde 245 kPa, kum zeminlerde ise 861 kPa mukavemet gözlenmiştir. Aktivatör 2’nin kullanıldığı kil zeminlerde 236 kPa, kum zeminlerde ise 353 kPa mukavemet gözlenmiştir. Killi-kum örnekler ise her iki likit aktivatör oranında da kil ve kum zemin örneklerinden daha yüksek mukavemet değerleri vermiştir. Aktivatör 1 ilavesinin etkin olduğu kanısına varılmıştır. Ayrıca, Na₂SiO₃ miktarının artışı ile en büyük mukavemet değerlerine karşılık gelen eksenel şekil değiştirmeler de artmaktadır. Bu da mekanik davranışın daha sünek olduğunu ifade etmektedir.

Çizelge 2. Metot 1’e Göre Hazırlanan 28, 56 ve 90 Gün Küre Bırakılan Örneklerin Serbest Basınç Mukavemetleri (SBM)

Table 2. Unconfined compressive strength of specimens prepared with method 1 and cured for 28, 56, and 90 days

Örnek Adı	28 Gün (kPa)	56 Gün (kPa)	90 Gün (kPa)	28 Gündeki SBM’ye Karşılık Gelen Eksenel Şekil Değişirme (%)
C7030	236	354	456	1,53
C9010	245	918	1114	2,15
CS7030	740	1467	2562	1,40
CS9010	1075	2131	2895	2,68
S7030	353	904	1648	1,80
S9010	861	3681	4784	4,28

Çizelge 2’ye bakıldığında S9010 kum örneğinin oldukça yüksek mukavemete ulaştığı görülmektedir. 90 günde 4784 kPa mukavemete ulaşılmıştır. Killi kum örnekler de ise 3000 kPa’ya yaklaşan serbest basınç mukavemeti göze çarpmaktadır. Zemin örnekleri için metot 1 uygulandığında %90 Na₂SiO₃-%10 NaOH likit aktivatörü 28 günlük örneklerle uyumlu olarak 90 günde de daha etkin bir aktivatördür.

Sıcaklık Etkisi - Metot 2 ile Geopolimerizasyon (Temperature Effect – Geopolimerization with Method 2)

Çizelge 3'te kil (C), killi kum (CS) ve kum (S) örneklerin her iki aktivatör ile hazırlanarak 1 gün 80°C sıcaklıkta bir etüvde bekletilip ardından 20°C sıcaklıkta 7 ve 28 gün küre tabi tutulduktan sonraki serbest basınç mukavemeti (SBM) değerleri özetlenmektedir.

Örneklerin geopolimerizasyon metodunun serbest basınç mukavemetlerini önemli ölçüde etkilediği, hatta kullanılacak likit aktivatör oranlarının da kür metoduna uygun olarak seçilmesi gerektiği görülmüştür. Çizelge 3'te aktivatör 2 kullanılarak hazırlanan örneklerin mukavemetleri aktivatör 1 kullanılarak hazırlanan örneklerin mukavemetinden büyüktür. Bu durum bir önceki başlıkta incelenen durumun tam tersidir. Bununla birlikte her likit aktivatör oranında ulaşılan mukavemet mertebeleri de farklı olmuştur.

Çizelge 3. Metot 2'ye Göre Hazırlanan 7 ve 28 Gün Küre Bırakılan Örneklerin Serbest Basınç Mukavemetleri (SBM)

Table 3. Unconfined compressive strength of specimens prepared with method 2 and cured for 7 and 28 days

Örnek Adı	Kürsüz (kPa)	7 Gün (kPa)	28 Gün (kPa)	28 Gündeki SBM'ye Karşılık Gelen Eksenel Şekil Değişirme (%)	38°C ile 28 Gün SBM Karşılaştırması
C	315	-	-	3,88	-
C7030	-	239	271	1,64	%13 artış
C9010	-	168	215	2,19	%13 azalma
CS	316	-	-	2,58	-
CS7030	-	890	985	1,42	%33 artış
CS9010	-	747	860	2,37	%20 azalma
S7030	-	320	385	1,87	%8 artış
S9010	-	564	830	2,89	%4 azalma

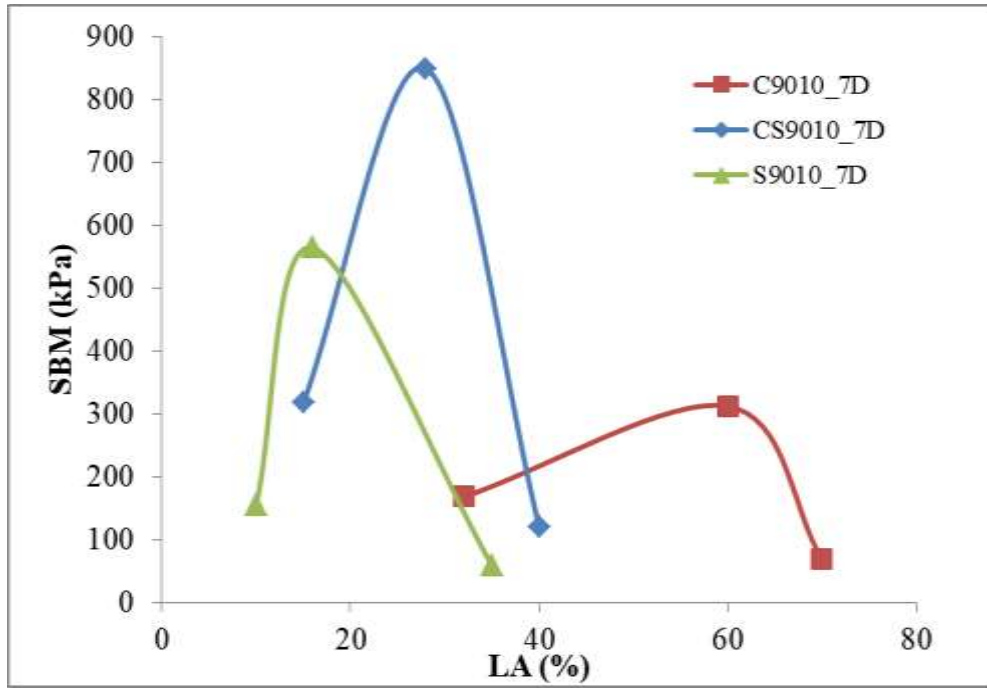
En belirgin değişim CS7030 örneğinde gözlenmiş olup serbest basınç mukavemeti %33 artmıştır. Örnekler en yüksek mukavemet değerlerine daha küçük eksenel şekil değişirme yüzdelerinde ulaşmışlardır, diğer bir deyişle bu kür metodunda pik mukavemet gevrek davranış gösteren örneklerle elde edilmiştir.

Likit aktivatör içermeyen kil örnekler (C grubu) incelendiğinde ise likit aktivatör eklenmesinin kür metodundan bağımsız olarak serbest basınç mukavemeti değerlerini erken dönemde (28 gün) azalttığı gözlenmiştir. Metot 2 ile bu çalışmada 28 güne kadar inceleme yapılabilmektedir ve sadece kil örnek gruplarında katkısız zeminin mukavemetinden daha yüksek mukavemete ulaşamamıştır. Ancak bu zeminlerde 7 günde katkısız zemine göre daha düşük mukavemet gözlenirse de 28 günde mukavemet 7 güne kıyasla artmaktadır. Bu durum kil örneklerin uzun dönem mukavemetlerin gözlenmesinin gerekli olduğunu göstermektedir. Metot 1 ile yapılan geopolimerizasyon uygulamasında (Çizelge 2) 90 günde katkısız kil örneklerin 1,5-3,5 katı mukavemete ulaşılmıştır. Metot 2'nin uygulandığı killi kum örneklerinde ise aktivatör 2'nin kullanıldığı durumda iyileştirmenin gerçekleştiği görülmüştür.

Likit Aktivatör Miktarının Değişken Olduğu Örnekler (Samples with Varying Amount of Liquid Activator)

Gerek metot 1 gerekse metot 2 ile hazırlanan kil örneklerin serbest basınç mukavemeti değerlerinin katkısız kil örneklerden daha düşük mukavemet vermesi ilgi çekicidir. Bu durumda ortama eklenen likit aktivatör miktarının (bağlayıcı malzemeyi artırmak) artırılması gereklidir. Bu fikirle, zeminin optimum su içeriğinden farklı oranlarda aktivatör ilavesinin etkileri incelenmiştir. Kil örneklerde %32-60-70 (optimumun sağında iki adet), kum örneklerde %10-16-35 (optimumun solunda ve sağında), killi kum örneklerde %15-28-40 (optimumun solunda ve sağında) oranlarında likit aktivatör ile çalışılarak sonuçlar raporlanmıştır. Birim maliyetleri düşürmek adına, aktivatör 1 kullanıldığında düşük mukavemet veren geopolimerizasyon metodu 2 ile hazırlanarak en az iyileştirmenin beklendiği şartlar temsil edilmiştir. Bu

şartlar altında serbest basınç mukavemetlerinin artmasının mümkün olup olmadığı da belirlenmiştir. Bu bölümde örneklerin kür süresi 7/28 gündür.



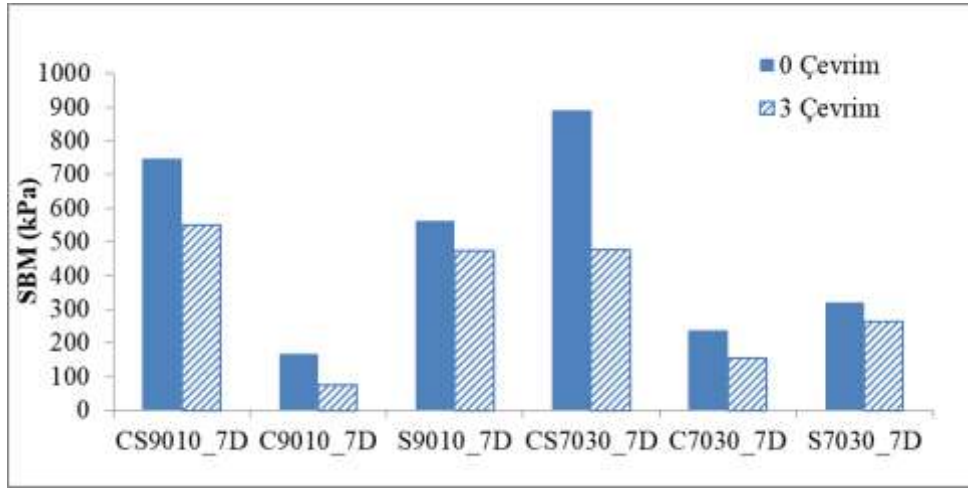
Şekil 5. Farklı Likit Aktivatör Oranlarında Hazırlanan Zemin Örneklerinin Serbest Basınç Mukavemeti Değerleri (D: Kür süresidir)

Figure 5. Unconfined compressive strength of soil samples prepared with different liquid activator ratios (D: curing time)

Killi kum ve kum örnekler, 7 günde optimum su içerikleri olan %28 ve %16 likit aktivatör içeriklerinde en yüksek serbest basınç mukavemetleri olan 747 ve 564 kPa değerlerine ulaşmıştır. 28 günde killi kum örnekler 860 kPa, kum örnekler 830 kPa mukavemete ulaşmıştır. Kil zeminlerin likit aktivatör oranı optimum su içeriği kadar olduğunda bu değer %32'dir ve 168 kPa mukavemete sahiptir. Oysa likit aktivatör oranı yaklaşık 2 katına çıkarıldığında (%60) mukavemet 7 günde 312 kPa olup yaklaşık zeminin katkısız haline eşittir. 28 günde ise 555 kPa mukavemet ölçülmüştür. Bu da katkısız zemine göre %43'lük bir artış demektir. Bu durum kil içeren örneklerde mukavemet artışının daha geç gerçekleştiği görüşünü kuvvetlendirmekte ve Heah ve diğ. (2012)'nin bulguları ile örtüşmektedir.

Donma -Çözünme Etkileri (Freeze - Thaw Effects)

Metot 2 ile geopolimerizasyonu sağlanan örnekler 7 gün küre bırakılmıştır. Ardından 3 çevrim donma-çözünme sonundaki mukavemetleri de belirlenmiştir (Şekil 6). 3 çevrim sonunda en büyük mukavemet azalımı C9010 (%55) ve CS7030 (%46) örneklerinde tespit edilmiştir. Genel olarak kum zeminlerin donma-çözünme çevrimlerine karşı daha dayanıklı oldukları tespit edilmiştir. Bu örneklerde mukavemet ortalama %17 azalmıştır.



Şekil 6. 3 Çevrim Donma Çözünme Sonucu Gözlemlenen Mukavemet Kayıpları (D: Kür süresidir)

Figure 6. Strength decrements due to 3 cycles of freeze-thaw (D: curing time)

Zeminlerin donma-çözünme etkilerine olan hassasiyetleri kapilarite ve permeabilite gibi hidrolik özelliklerinden etkilenmektedir. Bu bağlamda killerin ve kil içeren zeminlerin dikkatle ele alınması önerilmektedir (FHWA, 2006). Killi zeminler, donma sıcaklığına ve su içeriği değişimine duyarlıdır. Sıcaklık 0 °C'nin altına düştüğünde, boşluk sıvısı kısmen buz kristaline dönüşür ve hacim genişlemesi nedeniyle donmaya başlar. Sıcaklık 0° C'nin üzerine çıktığında, zemin buz kristali erir ve çözünme ile zayıflama görülür (Andersland ve Ladanyi, 2003). Eskişar ve diğ. (2015), zemindeki mikrofisürlerin oluşumu ile boşluk hacminin artarak killi zeminlerin permabilitesinin arttığını, Kravchenko ve diğ. (2018) ise kil minerallerinin temas noktalarında bozunma gerçekleşerek zemin bileşiminin değiştiğini söylemektedir. Bu bilgiler kil (C) ve killi kum (CS) zemin gruplarında neden daha fazla mukavemet kaybının oluştuğunun sebeplerini açıklamaktadır. Bir başka yaklaşım ise şudur, boşluk sıvısının alkali aktivatör olması nedeniyle permeabilitesi kilden daha yüksek olan kum örneklerde, kile göre daha büyük ölçekli boşlukların bu sıvı ile dolması sonucu, sıvının 7 günlük kür süresi boyunca sertleşmesi sonucunda daha rijit bir yapı elde edilmiştir, bu durum kum zeminlerde donma-çözünme çevrimleri sonrasında oluşan mukavemet kaybını azaltıcı bir etkiye sahip olmuştur. Ancak, zeminin boşluk sıvısının içeriğinden ziyade zemin türünün daha önemli bir faktör olduğu görülmüştür.

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, geopolimerizasyon metoduna bağlı olarak NaOH molaritesinin etkisi, sıcaklık etkisi, %70 Na₂SiO₃-%30 NaOH ve %90 Na₂SiO₃-%10 NaOH kullanılarak hazırlanan iki aktivatörün etkisi, aktivatör 1'in miktarının değiştirilmesi sonucu gelişen etki, kür süresi ile mukavemetteki değişimler ve 3 çevrim donma-çözünmenin serbest basınç mukavemeti üzerindeki değişimleri araştırılmıştır.

Sonuçlar özetlenecek olursa şu çıkarımlar yapılabilir.

28 günlük örnekler için:

- Metot 1 tercih edildiğinde likit aktivatörde kullanılacak Na₂SiO₃ yüzdesinin de artması gerekmektedir.
- Metot 1 uygulandığında aktivatör 1 kullanılarak geopolimerizasyonu sağlanan örneklerin kırımı ile pik mukavemetler elde edilmiş ve davranış aktivatör 2'ye göre daha sünek gelişmiştir. Oysa, metot 2'de genel olarak aktivatör 2 daha etkin olmuştur; pik mukavemetler aktivatör 1 ile hazırlanan örneklere kıyasla, daha gevrek kırılmaları işaret etmektedir. Kısaca, geopolimerizasyonun uygulama şartları zeminin performansını önemli ölçüde değiştirebilecek güce sahiptir.
- Bu çalışmada en yüksek mukavemet değeri CS9010 örneklerinde 1075 kPa olarak bulunmuştur.

- Kil zeminlerde likit aktivatör oranının optimum su içeriğinin yaklaşık 2 katına çıkarılması gerekmektedir. Ancak iki kat likit aktivatör kullanıldığında, mukavemet gelişimi 28. günde ortaya çıkmakta yani mukavemet gelişimini kısa sürede tespit etmek mümkün olmamaktadır.

Diğer örneklerde ise:

- Uzun dönem mukavemetlerde ise S9010 örnekleri en iyi performansı göstermiştir.
- Likit aktivatör içindeki NaOH molaritesinin artışı mukavemeti olumlu yönde etkiler, ancak maliyetleri arttırır. Molarite değişiminin sahaya uygun bir fizibilite çalışması sonucunda kararlaştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada 8 mol NaOH kullanımı ile elde edilen sonuçlar sunulmuştur.
- 7 günlük örneklerde 3 çevrim sonunda en büyük mukavemet azalımı C9010 (%55) ve CS7030 (%46) örneklerinde tespit edilmiştir. Genel olarak kum zeminlerin donma-çözünme çevrimlerine karşı daha dayanıklı oldukları tespit edilmiştir. Bu örneklerde mukavemet ortalama %17 azalmıştır.

Sonuçta, sadece likit aktivatör katkısının geopolimerizasyon metodunun doğru seçildiği durumda (sıcaklığın etkisi de dikkate alındığında) zeminlerin mukavemetlerini ortalama 2,5-3 kat arttırıcı bir etkisi olduğu görülmüştür. Daha yüksek mukavemetlere ihtiyaç duyulduğunda zeminlere uçucu kül, pirinç kabuğu külü veya volkanik kül gibi bir prekürsör ilavesinin gerekli olacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abdullah, M.S., Ahmad F., Mustafa Al Bakri, A.M., 2015, "Geopolymer Application in Soil: A Short Review", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 754-755, pp. 378-381.
- Adhikari, S., Khattak, M.J., Adhikari, B., 2018, "Mechanical Characteristics of Soil RAP-Geopolymer Mixtures for Road Base and Subbase Layers", *International Journal of Pavement Engineering*.
- Alshaaer, M., 2013, "Two-Phase Geopolymerization of Kaolinite-Based Geopolymer". *Applied Clay Science*, Vol. 86, pp. 162-168.
- Andersland, O.B., Ladanyi, B., 2003, *Frozen Ground Engineering*, John Wiley and Sons Ltd., ASCE.
- ASTM D560, 2016, *Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures*, pp.6.
- ASTM D698, 2012, *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*, pp. 13.
- ASTM D2166, 2016, *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*, pp. 7.
- ASTM D2487, 2017, *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, pp. 11.
- Ayyappan, A., Palanikumar, S., Kumar, D., Vinoth, M., 2017, "Influence of Geopolymers in The Stabilization of Clay Soil", *International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research*, Vol. 5, pp 108-120.
- Binal, A., Kasapoğlu, K.E., Gökçeoğlu, C., 1997. "The surficial physical deterioration behaviour of Neogene volcanosedimentary rocks of Eskişehir-Yazılıkaya". In: Marinos, Koukis, Tsiambaos, Stournaras (Eds.), *Proceedings of Engineering Geology and the Environment*, A.A. Balkema Publishers, The Netherlands, pp. 3065-3069.
- Bing-hui M., Zhu, H., Xue-min, C., Yan, H., Si-yu, G., 2014, "Effect of Curing Temperature on Geopolymerization of Metakaolin-Based Geopolymers", *Applied Clay Science*, Vol. 99, pp. 144-148.
- Eskişar, T., Altun, S., Kalıpcılar, İ., 2015, "Assessment of strength development and free-ze-thaw performance of cement treated clays at different water contents", *Cold Reg. Sci. Technol.*, 111, pp. 50-59.
- FHWA (Federal Highway Administration), 2006, "Geotechnical Aspects of Pavements Reference Manual", *U.S. Department of Transportation Publication No. FHWA NHI-05-037*, May 2006, NHI Course No. 132040.
- Ghadir, P., Ranjbar N., 2018, "Clayey Soil Stabilization Using Geopolymer and Portland Cement", *Construction and Building Materials*, Vol. 188, pp. 361-371.

- Heah, C.Y., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A.M., Binhussain, M., Lugman, M., Nizar, I.K., Ruzaidi, C.M., Liew, Y.M., 2011, "Effect of Curing Profile on Kaolin-based Geopolymers", *Physics Procedia*, Vol. 22, pp. 305 – 311.
- Heah, C.Y., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A.M., Binhussain, M., Lugman, M., Nizar, I.K., Ruzaidi, C.M., Liew, Y.M., 2012, "Study on Solids – to-Liquid and Alkaline Activator Ratios on Kaolin – Based Geopolymers", *Construction and Building Materials*, Vol. 35, pp. 912-922.
- Holtz, R.D., Kovacs, W.D., 1981, *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 07632, New Jersey.
- Konrad, J.M., Samson, M., 2000, "Hydraulic Conductivity of Kaolinite–Silt Mixtures Subjected to Closed-System Freezing and Thaw Consolidation", *Can. Geotech. J.*, Vol. 37, pp. 857–869.
- Kravchenko, E., Liu, J.K., Niu, W.W., Zhang, S.J., 2018. "Performance of clay soil reinforced with fibers subjected to freeze-thaw cycles", *Cold Reg. Sci. Technol.* 153, pp.18–24.
- Moayedi, H., Huat, B.K., Moayedi, F., Asadi, A., Parsaie, A., 2011, "Effect of Sodium Silicate on Unconfined Compressive Strength of Soft Clay", *EJGE*, Vol. 16, pp. 289-295.
- Morsy, M.S., Alsayed, S.H., Al-Salloun, Y., Almusallam, T., 2014, "Effect of Sodium Silicate to Sodium Hydroxide Ratios on Strength and Microstructure of Fly Ash Geopolymer Binder", *Arabian Journal For Science and Engineering*, Vol. 39, pp. 4333–4339.
- Palanisamy, P., Suresh Kumar, P., 2018, "Effect of Molarity in Geopolymer Earth Brick Reinforced with Fibrous Coir Wastes Using Sandy Soil and Quarry Dust As Fine Aggregate. (Case study)", *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 8, pp. 347-358.
- Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Suksiripattanapong, C., Udomchai, A., 2016, "Strength Development in Soft Marine Clay Stabilized by Fly Ash and Calcium Carbide Residue Based Geopolymer", *Applied Clay Science*, Vol. 127–128, pp. 134–142.
- Rovnanik, P., 2010, "Effect of Curing Temperature on The Development of Hard Structure of Metakaolin-based Geopolymer", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 1176–1183.
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., Chindaprasir, P., 2011, "NaOH-activated Ground Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature", *Fuel*, Vol. 90, pp. 2118–2124.
- Swain, K., 2015, *Stabilization of Soil Using Geopolymer and Biopolymer*, National Institute of Technology, Rourkela.
- Uddin, M.N., Saraswathy, V., 2018, " A Comparative Study on Clay and Red Soil Based Geopolymer Mortar", *Civil Engineering and Architecture*, Vol. 6, pp. 34-39.
- Wong, L., Haug, M., 1991, " Cyclical Closed-System Freeze-Thaw Permeability Testing of Soil Liner and Cover Materials", *Can. Geotech. J.*, Vol. 28, pp. 784-793.
- Zhang, M., Guo, H., El-Korchi, T., Zhang, G., Tao, M., 2013, "Experimental Feasibility Study of Geopolymer As The Next-Generation Soil Stabilizer", *Construction and Building Materials*, Vol. 47, pp. 1468–1478.