

Research Paper / Araştırma Makalesi

Polivinil Reçine Bağlayıcı ile İyileştirilen Silt Türü Bir Zeminin Dayanım Değerlerinin İncelenmesi: Bağlayıcı Miktarı ve Kür Sıcaklığı Etkisi Üzerine Deneysel Bir Çalışma

Investigation of Uniaxial Compressive Strength Values of A Polyvinyl Resin Reinforced Silt: An Experimental Study on Resin Amount and Curing Temperature

Eren KÖMÜRLÜ 

Giresun Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Giresun

Received (Geliş Tarihi): 01.06.2020, Accepted (Kabul Tarihi): 29.11.2020
Corresponding author (Sorumlu Yazar): ekomurlu@giresun.edu.tr

ÖZ

Bu çalışmada polivinil asetat (PVA) reçine türü termoset polimer bağlayıcı kullanılarak silt türü zemin numuneleri oluşturulmuştur. Numune hazırlamadan önce elenerek sınıflandırılmış ve testlerde zemin sınıfı ML kodlu inorganik silt olarak belirlenen numune kullanılmıştır. Giresun ili merkez ilçesine ait silt numunesi farklı oranlarda (kütleye %7 ve %14) polivinil reçine ile karıştırılarak kalıplanmış ve tek eksenli basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre polivinil reçine bağlayıcı miktarı artışı ile dayanım değerleri de artmıştır. %7 ve %14 polivinil reçine içeren numunelerin dayanımları oda sıcaklığı kür koşullarında ortalama sırasıyla 0,9 MPa ve 1,6 MPa olarak belirlenmiştir. Ayrıca, farklı kür sıcaklıklarının (5°, 25°, 50°) polimerleşme üzerindeki etkileri incelenmiş ve sıcaklık artışı ile dayanım değerlerinde iyileşme olduğu belirlenmiştir. İncelenen değerler aralığında kür sıcaklığına bağlı olarak dayanımın %59 oranına kadar artış gösterdiği ölçülmüştür. PVA farklı uygulamalarda avantaj sağlayabilecek bir zemin bağlayıcısı olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Polimer bağlayıcılar, polivinil reçine, polivinil asetat, PVA, zemin iyileştirme

ABSTRACT

In this study, silt type soil specimens were prepared by using polyvinyl acetate (PVA) resin type thermoset polymer binder. Before the specimen preparation, the soil was classified by sieving and determined to be ML coded inorganic silt according to the Atterberg limit tests. The soil specimen was taken from the Giresun city and the PVA resin was mixed with different amounts of 7% and 14% by weight. The uniaxial compressive strength (UCS) values of the specimens were determined to investigate the effect of varying PVA amounts in the mix. Additionally, different curing temperatures (5°, 25°, 50°) were investigated to assess whether the temperature is an important factor for the performance of the PVA binder. According to the results obtained from this study, specimens with 7% and 14% PVA resin had mean UCS values of 0.9 MPa and 1.6 MPa, respectively. For the investigated interval, UCS values were evaluated to increase up to 59% with increasing curing temperature values. The PVA type polymer resin was assessed to be an advantageous soil binder for various applications.

Keywords: Polymeric binders, polyvinyl resin, polyvinyl acetate, PVA, ground improvement

GİRİŞ

Zemin iyileştirme işlemlerinde polimer bağlayıcı malzeme kullanımı günümüzde yaygınlaşmaktadır. Sıvı fazda bulunan birleşenler zemine karıştırıldıktan sonra polimerleşme ve katılaşma neticesinde bağlayıcı özellik gösterir ve zemin dayanımı artırılmış olur. Sıvı fazda birleşenlerin karışımı ve katılaşmaya başlaması arasında

geçen süre ürün türüne bağlı geniş bir aralıkta değişebilmektedir. Polimerleşme öncesi birleşenlerin sıvı fazda olması termoset türü polimerlerin genel özellikleri arasındadır. Poliüretan, Epoksi, Polyester, Poliüre gibi zemin iyileştirme amaçlı kullanılmakta olan çeşitli termoset türleri mevcuttur (Anagnostopoulos ve ark., 2017; Spagnoli, 2018; Saleh ve ark., 2019). Termosetler bir veya birden çok sıvı fazda birleşene sahiptir. Birleşenin

veya karışımlarının sıvı fazda kalma süresi ve akışkanlığı ürün türüne göre değişiklik göstermektedir. Zemin iyileştirme çalışmalarında iyi bir verim alınabilmesi için termoset birleşenlerin akışkanlığı ve sıvı fazla kalma süresi geçirimsizlik gibi ilgili zemin parametrelerine uygun olarak tercih edilmelidir (Kömürlü ve Kesimal, 2012; Guo ve ark., 2019).

Üretici firmalar aynı tür termoset ürünler için dahi geniş aralıkta değişen sıvı fazda kalma süresine sahip polimerler üretebilmektedir. Termoset polimerlerin katılaşması üç evreden oluşmaktadır. Bunlardan ilk evre kremleşme süresidir, bu süre karışımdan reaksiyonun başladığı ana kadar geçen süredir. Bu süre ürünün özelliğine bağlı olarak saniyeler veya dakikalar mertebesinde değişim gösterebilmektedir. Kremleşme süresi termoset polimer malzeme seçiminde önemli bir değişkendir. Ürünün kullanım amacına bağlı olarak kremleşme süresi uzun veya kısa tutulabilir. Bu evrede akışkan halde olan malzeme zeminin boşluk hacimlerine nüfuz eder. Bu süreden sonraki ikinci evre jelleşme süresidir. Bu evrede malzemenin polimerleşme reaksiyonu gerçekleşerek kıvamlanır. Jelleşen malzeme zeminin boşluk hacminde kısıtlı bir ilerleme sağlamaktadır. Daha sonraki evrede ise katılaşma yaşanır ve çoğu termoset polimer ürün satlar içinde maksimum dayanım değerlerine yaklaşmış olmaktadır (Kömürlü ve Kesimal, 2015; Miroshnichenko ve ark., 2018).

Sıvı fazda termosetler aynı zamanda polimer reçine olarak ta kullanılabilir. Polimer reçineler temel olarak bir kalıp içerisine dökülerek şekillendirilebilen ve yapışkan özelliğe sahip termoset bazlı polimerler olarak tanımlanabilir. Bir diğer ifadeyle iyi yapışma performansı amaçlı kullanılan termosetlerin genel adıdır. Bu sebeple çeşitli kompozit imalatlarında polimer reçine ürünleri bağlayıcı olarak kullanılmaktadır (You ve ark., 2015; Li ve ark., 2016). Polimerler malzemeler temel olarak termoplastikler ve termosetler olarak iki ana gruba ayrılabilirler. Termosetler katılaştıktan sonra tekrar eritilerek yeniden kalıplanamazken, termoplastikler ısı işlemi ile tekrar şekillendirilebilen ve geri dönüşüme uygun polimer türleridir. Termosetler polimer zincirleri içerisinde fazla çapraz bağlar olması ve ısıtıldıklarında bu bağların kopması sebebiyle kimyasal bozunma yaşarlar. Termosetler bu yüzden ısı işlemleri geri dönüşüme uygun olmayan polimerlerdir. Termosetlerin avantajı ise sıvı fazda temin edilebilmeleri ve çoğu zaman kalıplama, dolgu, enjeksiyon vb. işlemlerde pratik olarak kullanılabilirlerdir. Diğer taraftan, termoplastiklerin şekillendirilmesi, kalıplama ve dolgu gibi işlemleri için çok yüksek sıcaklıklara çıkılması gerekmektedir. Bu sebeple, sıvı fazda zemine uygulanan zemin bağlayıcıları olarak termoplastikler kullanışlı olmamaktadır.

Sıvı fazda termoset polimer reçineler döküm veya enjeksiyon ile farklı şekillerin verilebildiği ürünlerdir ve bir kompozit bağlayıcısı olarak ta kullanılmaktadırlar. Yaygın kullanılan ismi ile fiberglass (Cam lif katkılı kompozit plastikler) polimer reçineli kompozitler deyince genelde akla ilk gelendir. Epoksi, polyester, vinilester gibi farklı termoset polimer reçine ürünler lif katkılı kompozitlerde bağlayıcı olarak kullanılmakta ve maliyetleri amaca bağlı olarak değişebilmektedir (Das ve Nizam, 2014; Zhang ve ark., 2016). Bu çalışmada Polivinil asetat (PVA) reçine türü termoset bir polimer ürünün bağlayıcı katkı olarak zemin iyileştirme işlemlerinde kullanımı incelenmiştir. PVA reçine çok amaçlı bir yapıştırıcı ürün olarak temin edilebilmektedir. Kullanılan PVA türü polimer ürün 30.11.2019 tarihinde 24 TL/kg fiyatı ile temin edilmiştir. Test edilen ürün su ile kütlece 1/1 oranında karıştırılarak kullanımı önerilen, 24 saat içerisinde polimerleşmesini tamamlayan ve hızlı mukavemet sağlayabilecek bir polimer reçine ürünüdür.

Bu çalışmada PVA reçinenin farklı oranlarda karıştırılmasıyla silt türü bir zeminin dayanım değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bağlayıcı oranına ek olarak farklı kür sıcaklıklarının dayanım değerlerine olan etkisi de bir dizi deneysel çalışma ile incelenmiştir. Deneysel yöntemlere yönelik detaylar sıradaki başlık altında verilmiştir.

Bu çalışmada numune hazırlama yöntemi olarak bir zeminin yerinde enjeksiyon ile güçlendirilmesi değil, dolgu vb. uygulamalardan önce bağlayıcı ile karışım oluşturma konusunda bulgular sağlanmaktadır. Zemin enjeksiyonu olarak kullanılması hususunda, yüksek basınç sağlayacak ekipmanlar ile zemin içerisine bağlayıcının nüfuz edebilme özelliği zemin türüne göre değişiklik gösterebilecektir. İlgili ürünün enjeksiyon malzemesi olarak kullanımı bir diğer çalışma konusu olabilecektir.

MATERYAL VE YÖNTEM

PVA türü sıvı reçine kütlece 1/1 oranında su ile karıştırılarak zemin bağlayıcısı olarak kullanılmıştır. PVA reçine/su karışımı zemin numuneleri ile çeşitli oranlarda karıştırılarak bağlayıcı miktarı farklı numuneler üretilmiştir. Bu çalışmada 50 nolu elekten geçmiş 297 mikrometre altı dane boyuna sahip zemin kullanılmıştır. Ayrıca, zeminin kütlece %64'lük kısmının da açıklığı 88 mikrometre olan 170 numaralı elekten geçtiği belirlenmiştir. Giresun merkez ilçesi Güre mevkiinden alınan ve elek kullanılarak elde edilen numunenin sınıflandırılması için Atterberg kıvam limitleri deneyleri gerçekleştirilmiştir. Plastik limit ve Casagrande likit limit deneyi ASTM D3418-10 kodlu Amerikan standardında (ASTM International, 2010) belirtilen yöntemle uygun olarak yapılmıştır. Numuneler standart Casagrande kasesi üzerine yerleştirilerek standart yarık açma bıçağı ile kesilmiş ve kase

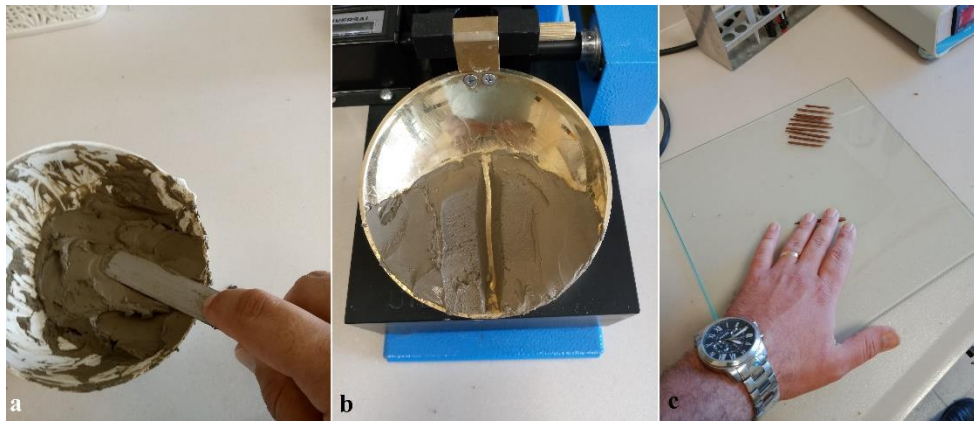
üzerinde ikiye bölünmüştür. Kase otomatik motor yardımı ile tekrarlı olarak düşmüş ve 25 vuruşa denk gelen yarıka kapanmanın yaşandığı su içeriği likit limit değeri olarak belirlenmiştir (ASTM International, 2010). Su içeriği su kütlelerinin kuru (katı) kütleyle oranı olarak hesaplanmıştır. Plastik limit ve likit limit değerlerinin belirlenmesi için numuneler 105 °C derecede 1 gün süre ile etüvde bekletilerek kurutulmuştur. Plastik limit deneyi için yaygın olarak uygulanmakta olan cam plaka üzerinde çubuk yuvarlama deneyi yapılmıştır. Çubuk numunelerin çapları 3 mm'ye düştüğünde yüzeyinde çatlama gösterdiği su içeriği olarak plastik limit değerleri ASTM D3418-10 standardına uygun biçimde bulunmuştur (Şekil 1). Kullanılan zeminin sınıflandırılmasına yönelik kıvam limiti deneylerinin gerçekleştirilmesinden sonra PVA bağlayıcı ile karıştırılmış numune üretme işlemine geçilmiştir.

Zemin numunesi araziden getirildikten sonra dane yüzey neminin alınması için bir süre etüve konmuş ve eleme öncesi danelerin iyi ayrışması için zemin düz yüzeyli bir taş blok kullanılarak darbe ile ezilmiştir. Bağlayıcı ile karıştırılmadan önce elenmiş zemin yaklaşık bir gün oda sıcaklığında laboratuvarında beklemiş ve bir miktar hava nemi almıştır. Zemin ve PVA reçine türü bağlayıcı bir leğen içerisinde elle karıştırılmış, homojenizasyonu sağlanmış ve ardından iç çapı 46 mm olan plastik silindirik kalıplar içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 2). PVA bağlayıcı zemin karışımı 3 kademeli olarak kalıba doldurulmuş, her kademedden sonra numuneler 25 vuruş tokmakla sıkıştırılmıştır. Polivinil reçinenin toplam karışımında kütlece %7 ve %14 kullanıldığı iki farklı içerik ve

oda sıcaklığında kürlenme koşulu için 10 numune hazırlanmıştır. Ayrıca kütlece %7 PVA içeren numunelerin 5° ve 50° kür sıcaklıkları için beşer numune olmak üzere 10 adet numune daha hazırlanmış ve çalışmada toplam 20 adet numune kullanılmıştır. 5° ve 50° kür sıcaklıkları için numuneler bir gün süreyle Şekil 3'te görülen soğutucu dolapta ve etüvde bekletilmiştir. Boy/çap oranı 2 olan numuneler dayanım testi öncesi kalıplarında kürlenmiş ve test öncesi kalıptan çıkarılmıştır. Test edilen tüm numunelerin kalıplama prosedürü tamamı ile aynıdır. Kalıp olarak uzunluğu boyunca kesilmiş (yarıklı) 2 mm et kalınlığına sahip plastik boru kullanılmıştır. Numuneler kürendikten sonra yarık açılarak kalıplarından çıkarılmıştır. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyinde yükleme hızı 0.5 mm/dak olarak seçilmiştir. Numunelerin yükleme platenleri ile temas edecek üst yüzeylerindeki pürüzler falçata ile hafifçe alınmış, yüzeyler mümkün olduğunca düzleştirilmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı deneyine ait görsel Şekil 4'te verilmiştir.

Tablo 1. Kütlece numune içerik bilgileri (TKO: toplam kütlede oranı, RES: Reçine ile eklenen su)

İçerik	%7 PVA kullanımı için TKO (%)	%14 PVA kullanımı için TKO (%)
PVA	7	14
RES	7	14
Zemin	86	72



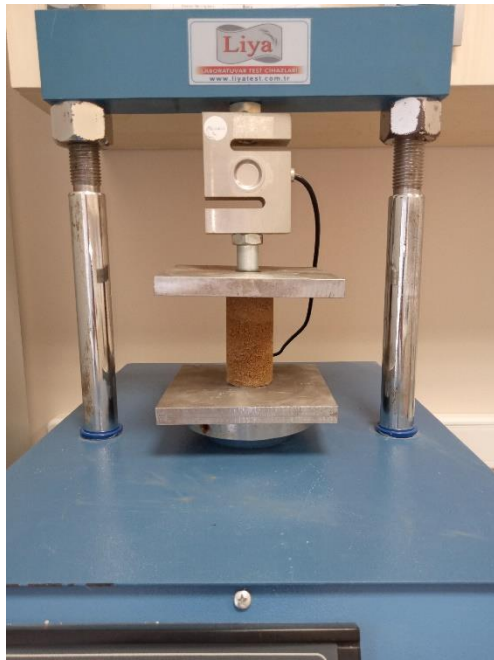
Şekil 1. Atterberg kıvam limitlerinin belirlenmesi: a) homojenizasyon, b) likit limit, c) plastik limit deneyleri



Şekil 2. A) PVA reçinenin tartılarak zeminle karıştırılması, b) Zeminle PVA reçinenin karıştırılması, c) kalıba PVA ve zemin karışımının yerleştirilmesi, d) tokmaktama ile sıkıştırma



Şekil 3. Isıtma ve soğutma işlemleri için kullanılan etüv (a) ve buzdolabı (b)



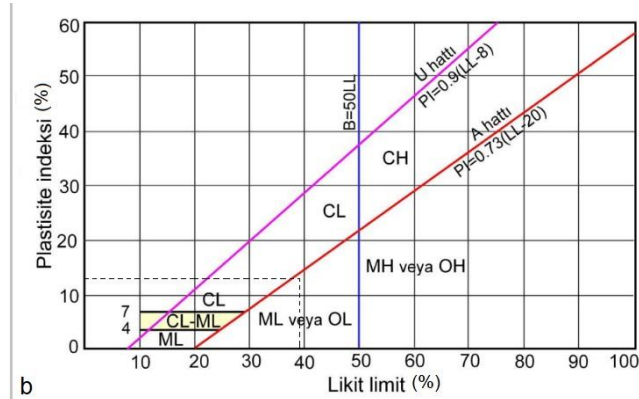
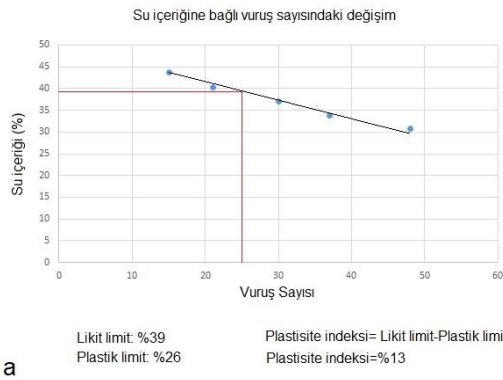
Şekil 4. Tek eksenli basınç dayanımı deneyi

BULGULAR

Casagrande likit limit deneyinden elde edilen bulgular Şekil 5a'da verilmiştir. Plastik limit değeri %26 bulunan zeminin ML kodlu inorganik silt olduğu belirlenmiştir (Şekil 5b). Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyinden elde edilen değerler Tablo 2'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre PVA reçine miktarı arttıkça dayanım değerleri de artış göstermiştir. Benzer şekilde kür sıcaklığı artışı ile de numunelerin dayanım değerlerinde iyileşme olduğu görülmüştür. Kütlece %14 PVA kullanımı neticesinde elde edilen kompozit malzemenin tek eksenli dayanım değerinin 1,6 MPa seviyesine çıkması önemli bir bulgudur. Karışımlarda PVA reçine kütlesi ile aynı kütlede su ilavesi olduğu hatırlanmalıdır. Sahada sık karşılaşılabilecek sıcaklık aralığı olarak 5° den 50° dereceye çıkılması ile %7 PVA içeren numunelerin dayanım değerinde %59 artış olması da elde edilen önemli bir diğer bulgu olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 2. Tek eksenli sıkışma dayanımı (TESD) deneyi sonuçları (SS: Standart sapma, KS5: 5° kür sıcaklığı, KS25: 25° kür sıcaklığı, KS50: 50° kür sıcaklığı)

Numune özelliği	TESD (kPa)	Numune Sayısı	SS (kPa)
%7 PVA-KS5	834	5	32
%7 PVA-KS25	920	5	28
%7 PVA-KS50	1327	5	37
%14 PVA-KS25	1581	5	45

**Şekil 5. a)** Likit limit değerinin belirlenmesi**b)** Casagrande zemin sınıflama kartı üzerinde zemin özelliklerinin gösterimi

SONUÇ VE TARTIŞMA

Zemin iyileştirme amacıyla polimer kimyasal bağlayıcı kullanımı özellikle son yıllarda hızla artmıştır. Bu kapsamda çok sayıda farklı malzeme denenmiş ve yeni ürünler geliştirilmiştir. PVA türü bağlayıcı kullanımının zemin mekanik özelliklerini iyileştirdiği konusunda elde edilen bulgu diğer çeşitli termoplastik ürünler üzerine yapılan literatürdeki diğer ilgili çalışmalar ile paralellik göstermektedir (Naeini ve Ghorbanalizadeh, 2010; Anagnostopoulos ve ark., 2014; Ostad-Ali-Askari ve Shayanejad, 2015; Rezaeimalek ve ark., 2017a). PVA reçine bağlayıcı ile zemin iyileştirme konusunda yeni çalışmalar incelenen polimer türünün farklı özelliklerini daha iyi anlamamız için gereklidir. Suda dağılma, aşınma, sıcaklık etkisi, donma çözünme vb. diğer etkilerin ilerleyen çalışmalarla PVA bağlayıcı kullanımı açısından değerlendirilmesi faydalı olacaktır. Malzeme bilimindeki gelişmeler neticesinde özellikle son yıllarda farklı polimer bazlı ürünlerin zemin iyileştirme amacıyla kullanıma girmektedir. Geoteknik mühendisliği açısından malzeme bilimindeki gelişmelerin takip edilmesi konusu pek çok konuda ilerleme kaydedilmesini için önemli olacaktır. Bağlayıcı miktarı ve kür sıcaklıklarındaki artış ile PVA bağlayıcılı zemin numunelerinin dayanım değerlerinin arttığı görülmüştür. Çoğu termoset ürün gibi PVA türü malzemelerin polimerleşmesinin de sıcaklığa bağlı iyileştiği görülmüştür. Çalışmada günlük yaşantıda karşılaşılabilen 5° ile 50° aralığında sıcaklık değişiminin incelenmiş olduğu

burada tekrar hatırlatılmak istenmektedir. Bağlayıcı karışımında su olduğu için donma olacak sıcaklıklara inilmemiştir. Bunun yanı sıra çok yüksek sıcaklıklara çıkılması termosetin polimerleşme tepkimelerine zarar verebilecektir (Kömürlü ve ark., 2016).

Uluslararası Kaya Mekaniği ve Kaya Mühendisliği Birliği (ISRM) 1-5 MPa aralığındaki dayanım değerlerine sahip kaya malzemelerini R1 grubu çok düşük dayanımlı kaya malzemeleri ve 5-25 MPa aralığındaki dayanım değerlerine sahip kaya malzemelerini ise R2 grubu düşük dayanımlı kaya malzemeleri olarak sınıflandırmıştır (ISRM, 2007). Bu çalışma kapsamında üretilen PVA bağlayıcılı silt numunelerinin R1 sınıfı kaya malzemesi dayanım değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Polimer reçine bağlayıcı zemin dayanım değerlerini önemli ölçüde artırarak kaya sınıfı dayanım değerlerini sağlayabilmektedir. PVA reçine türü bağlayıcının yapay kaya malzemesi üretimi amaçlı da kullanılabilmesi, ideal kür sıcaklığı, bağlayıcı oranı ve presleme gibi işlemler ile R2 sınıfı 5 MPa üzerine çıkan dayanım değerleri konusunda yeni incelemelerin gerçekleştirilebileceği değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan zeminin nem içeriğinin düşük olması sebebi ile PVA ve eklenen su 1/1 oranında kullanılmıştır. PVA reçine ideal su içeriğinde polimerleşmesini daha verimli olarak tamamlamaktadır. Bu sebeple zeminin kendi nem içeriği ve PVA reçineye karışım suyu birlikte dikkate alınmalıdır. Dane içindeki gözeneklerde

absorbe edilen suyun polimerleşme tepkimelerine katılmayacağı ancak dane dış yüzeyindeki nemin ve boşluk hacmi içerisindeki suyun polimerleşme tepkimelerine katılacağı unutulmamalıdır. PVA ile temas sağlayan toplam su ve PVA reçinenin mümkün olduğunca aynı kütleye sahip olması gerekmektedir. Bu sebeple, zeminle karıştırılacak PVA ve su karışımı içindeki su miktarı zeminin su içeriği de göz önünde bulundurularak tercih edilmelidir. Temas sağlayacak PVA ve su tam 1/1 oranda olmasa da bu orana yaklaşması, bu oranı aşmaması hedeflenmelidir. Bu kapsamda ilgili zemin için çeşitli ön inceleme ve deneyler neticesinde uygulama detayları belirlenebilir. PVA gibi su ile temas halinde polimerleşebilen yeni nesil bağlayıcılar ıslak zemin güçlendirme çalışmalarında avantaj sağlamaktadır (Kömürlü ve Kesimal, 2013; Chang ve ark., 2016; Rezaeimalek ve ark., 2017b). Islak bir zemine uygun miktarda PVA su ile karıştırılmadan direkt ilave edilebilir. Ancak su içeriği gibi su ve PVA reçinenin uygun temas koşullarını sağlaması, karıştırma ve homojenizasyonu önemli faktörlerdir.

Sonuç olarak, kullanılan PVA reçine bağlayıcının silt türü bir zeminin dayanım değerlerini önemli oranda iyileştirdiği görülmüştür. Bu çalışmadaki statik yük testlerinden elde edilen sonuçlar PVA bağlayıcı kullanımı üzerine gelecek yeni çalışmaların gerçekleştirilmesini destekler niteliktedir. PVA reçine bağlayıcı performansı için kür sıcaklığının önemli bir parametre olduğu da elde edilen sonuçlar arasındadır.

KAYNAKLAR

- Anagnostopoulos, C.A., Kandiotis, P., Lola, M., Karavatos, S. (2014). *Effect of epoxy resin mixtures on the physical and mechanical properties of sand*. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 7(17): 3478-3490.
- Anagnostopoulos, C.A., Sapidis, G. (2017). *Mechanical Behaviour of Epoxy Resin-Grouted Sand under Monotonic or Cyclic Loading*. *Geotechnique Letters* 7 (4): 298-303.
- ASTM International (2010). *ASTM D4318-10: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*, 2010 Annual Book of ASTM Standards. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- Chang, M., Mao, T., Huang, R. (2016). *A study on the improvements of geotechnical properties of in-situ soils by grouting*. *Geomechanics and Engineering* 10(4): 527-546.
- Das, S.C., Nizam, E.H. (2014). *Applications of Fibber Reinforced Polymer Composites (FRP) in Civil Engineering*. *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering* 3(3): 299-309.
- Guo, C., Sun, B., Hu, D., Wang F., Shi M, Li X. (2019). *A Field Experimental Study on the Diffusion Behavior of Expanding Polymer Grouting Material in Soil*. *Soil Mech Found Eng* 56: 171-177.
- ISRM (2007). *The blue book—the complete ISRM suggested methods for rock characterisation, testing and monitoring: 1974–2006*. Ulusay R, Hudson JA (eds). ISRM and Turkish National Group of ISRM, Ankara
- Kömürlü, E., Kesimal, A. (2012). *Poliüretan Malzeme ile Güçlendirilmiş Zemin Dayanımının İncelenmesi*. 14. Ulusal Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Kongresi, ISPARTA, TÜRKİYE, 4-5 Ekim 2012, ss.631-642.
- Kömürlü, E., Kesimal, A. (2013). *Geçmişten Günümüze Tünelcilik ve Tahkimat Malzemeleri*. *Madencilik* 52: 33-47.
- Kömürlü, E., Kesimal, A. (2015). *An Experimental Study on Polyurethane Foam Reinforced Soil use as Rock-like Material*. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 7(5): 566-572.
- Kömürlü, E., Kesimal, A., Demir, S. (2016). *Spraying Membrane Layer Effect on Load Bearing Performance of Concrete Liners*. *European Rock Mechanics Symposium 2016 (EUROCK 2016)*, Cappadocia, Turkey, 715-719p.
- Li, X., Aziz, N., Mirzaghorbanali, A., Nemcik, J. (2016). *Behavior of Fiber Glass Bolts, Rock Bolts and Cable Bolts in Shear*. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 49: 2723-2735.
- Miroshnichenko, S., Plugin, D., Kalinin, O., Zvierieva, A., Reznichenko, I. (2018). *Improved bearing resistance of soil foundations of buildings with injectable polyurethane composites*. *7th International Scientific Conference "Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings" (Transbud-2018)*, Article number: 03013.
- Naeini, S., Ghorbanalizadeh, M. (2010). *Effect of wet and dry conditions on strength of silty sand soils stabilized with epoxy resin polymer*. *Journal of Applied Sciences* 10(22): 2839-2846.
- Ostad-Ali-Askari, K., Shayannejad, M. (2015). *The Study of Mixture Design for Foam Bitumen and the Polymeric and Oil Materials Function in Loose Soils Consolidation*. *Journal of Civil Engineering Research* 5(2): 39-44.
- Rezaeimalek, S., Huang, J., Bin-Shafique, S. (2017a). *Mixing Methods Evaluation of a Styrene-Acrylic Based Liquid Polymer for Sand and Clay Stabilization*. *2017 International Conference on Transportation Infrastructure and Materials (ICTIM 2017)*, China, doi:10.12783/dtmse/ictim2017/10186
- Rezaeimalek, S., Huang, J., Bin-Shafique, S. (2017b). *Performance Evaluation for Polymer-Stabilized Soils*. *Transportation Research Record* 2657(1): 58-66.
- Saleh, S., Yunus, N.Z.M., Ahmad, K., Ali, N. (2019). *Improving the strength of weak soil using polyurethane grouts: A review*. *Construction and Building Materials* 202: 738-752.
- Spagnoli, G. (2018). *A review of soil improvement with non-conventional grouts*. *International Journal of Geotechnical Engineering*, DOI: 10.1080/19386362.2018.1484603
- You, Y.J., Kim, J.H.J., Kim, S.J., Park, Y.H. (2015). *Methods to enhance the guaranteed tensile strength of GFRP rebar to 900 MPa with general fiber volume fraction*. *Construction and Building Materials* 75: 54-62
- Zhang, K., Fang, Z., Nanni, A. (2016). *Behavior of Tendons with Multiple CFRP Rods*. *Journal of Structural Engineering* 142(10): 04016065.