Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

SIVI KOPOLİMER İLE İYİLEŞTİRİLEN KİL ZEMİNİN MUKAVEMET ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF THE STRENGTH PROPERTIES OF CLAY SOIL IMPROVED WITH LIQUID COPOLYMER

Fatih ARTUK[1], Ömer ODACI[2], Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK[3], Semet ÇELİK[4]

ÖZET

Artan nüfus ve buna bağlı olarak azalan uygun yapı alanları, zayıf zeminlerde de yapılaşmayı zorunlu hale getirmiştir. Bu durum, zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmaların önemini artırmış olup, özellikle çeşitli katkı malzemeleri kullanılarak zeminlerin geoteknik özelliklerinin geliştirilmesi üzerine yoğun araştırmalar yürütülmektedir. Bu çalışmada, yüksek plastisiteli bir kil (CH) zeminin sıvı kopolimer kullanılarak iyileştirilmesi ve polimer oranı ile kür süresinin zeminin mukavemet davranışı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla suda çözünebilen kopolimer kuru zemin ağırlığının %1, %2, %3 ve %4'ü oranlarında kullanılmış ve farklı katkı oranlarında hazırlanan numuneler üzerinde 3, 7 ve 28 günlük kür sürelerinin ardından serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar katkısız zemin ile karşılaştırılarak polimer oranının ve kür süresinin serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, polimer katkısının zemin mukavemeti üzerinde önemli bir iyileştirme sağladığını göstermiştir. Özellikle %2 oranında polimer katkısı içeren numunelerin en yüksek serbest basınç mukavemeti değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, kür süresinin artmasıyla birlikte numunelerin performansında belirgin bir iyileşme gözlemlenmiştir.
Anahtar Kelimeler: *Kil zemin, Polimer stabilizasyonu, Kopolimer katkı, Serbest basınç mukavemeti, Kür süresi*

ABSTRACT

Increasing population and the resulting decrease in suitable building areas have made construction on weak soils necessary. This situation has increased the importance of studies aimed at improving the engineering properties of soils, and intensive research is being conducted, especially on improving the geotechnical properties of soils using various additives This study aimed to improve a high-plasticity clay (CH) soil using a liquid copolymer and to determine the effects of polymer ratio and curing time on the soil's strength behavior. For this purpose, a water-soluble copolymer was used at 1%, 2%, 3%, and 4% of the dry soil weight. Unconfined compressive strength tests were performed on samples prepared with different additive ratios after curing periods of 3, 7, and 28 days. The results obtained were compared with the unadded soil to evaluate the effects of polymer ratio and curing time on unconfined compressive strength.The experimental results showed that polymer additive provided a significant improvement in soil strength. In particular, it was determined that the samples containing 2% polymer additive reached the highest unconfined compressive

[1] Dr. Öğr. Üyesi., Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, fatih.artuk@atauni.edu.tr
[2] Yüksek İnşaat Mühendisi, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, tahir87_25@hotmail.com (Sorumlu yazar)
[3] Doç. Dr., Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, znkurt@atauni.edu.tr
[4] Prof. Dr., Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, scelik@atauni.edu.tr

strength values. Furthermore, a significant improvement in the performance of the samples was observed with increasing curing time.
Keywords: *Clay soil, Polymer stabilization, Copolymer additive, Unconfined compressive strength, Curing time*

1. GİRİŞ

Nüfus artışı ve kentleşmeye bağlı olarak yapılaşmaya uygun alanların giderek azalması, mühendislik özellikleri yetersiz zeminlerin de yapılaşma amacıyla kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. Özellikle yüksek plastisiteli killi zeminler düşük taşıma gücü, yüksek deformasyon potansiyeli ve su içeriğindeki değişimlere karşı duyarlılıkları nedeniyle geoteknik mühendisliği uygulamalarında önemli sorunlara neden olabilmektedir. Bu tür zeminlerin tamamen kaldırılarak yerine uygun özelliklere sahip malzemelerin yerleştirilmesi teknik olarak mümkün olsa da maliyet, uygulama süresi ve çevresel etkiler açısından her zaman uygun bir çözüm değildir. Bu nedenle mevcut zeminlerin mühendislik özelliklerinin çeşitli yöntemlerle geliştirilmesi, geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak başvurulan bir yaklaşım haline gelmiştir.

Zemin iyileştirme uygulamalarında mekanik yöntemlerin yanı sıra çimento, kireç, uçucu kül ve çeşitli kimyasal katkılar uzun yıllardır kullanılmaktadır. Son yıllarda ise geleneksel katkılara alternatif olarak farklı polimer esaslı malzemelerin zemin stabilizasyonunda kullanımı dikkat çekmektedir. Polimerlerin düşük katkı oranlarında uygulanabilmesi ve zemin taneleri arasında bağlayıcı bir yapı oluşturabilmesi bu malzemelerin önemli avantajları arasında değerlendirilmektedir. Polimer ile kil mineralleri arasındaki etkileşim sonucunda polimer zincirlerinin zemin tanelerinin yüzeylerine tutunması ve taneler arasında bağ oluşturması zeminin mekanik davranışının geliştirilmesine katkı sağlayabilmektedir. Bununla birlikte polimer stabilizasyonunun etkinliği polimer türü, zemin mineralojisi, plastisite özellikleri, katkı oranı ve kür koşulları gibi birçok değişkene bağlıdır. Polimerlerin zemin iyileştirmede kullanılabilirliği üzerine gerçekleştirilen çalışmalar da bu malzemelerin farklı zeminlerde farklı performans gösterebildiğini ortaya koymuştur (Newman ve Tingle, 2004; Tingle vd., 2007).

Polimer katkılarının killi zeminlerin mukavemeti üzerindeki etkisini doğrudan inceleyen Naeini vd. (2012), farklı plastisite özelliklerine sahip üç killi zemine %2, %3, %4 ve %5 oranlarında suda çözünebilen polimer ilave etmiştir. Elde edilen sonuçlar polimer katkısının killi zeminlerin serbest basınç mukavemetini önemli ölçüde artırdığını, buna karşılık plastisite indisindeki artışın mukavemet üzerinde olumsuz etki oluşturduğunu göstermiştir. Ayrıca kür süresindeki artışın polimer ile iyileştirilmiş zeminlerin mukavemet artışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. (Naeini vd., 2012). Onyejekwe ve Ghataora (2015) farklı özelliklere sahip zeminlerde sıvı kimyasal stabilizatörlerin etkinliğini araştırarak elde edilen iyileşmenin zemin özelliklerine bağlı olarak değişebildiğini göstermiştir. Kolay vd. (2016) ise iki farklı ince daneli zeminde %2, %3, %4 ve %5 oranlarında sıvı akrilik polimer kullanarak polimer katkısının geoteknik özellikler üzerindeki etkisini araştırmış ve elde edilen bulguların zemin türü ile polimer oranına bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular polimer katkılı zeminlerde uygun katkı oranının belirlenmesinin önemini göstermektedir.

Polimer katkısının yanı sıra kür koşulları da mukavemet gelişimini belirleyen önemli faktörlerden biridir. Rezaeimalek vd. (2018), stiren akrilik esaslı sıvı polimer ile stabilize edilen kum ve yüksek plastisiteli kil üzerinde gerçekleştirdikleri deneylerde karışım özellikleri ile kür koşullarının elde edilen mukavemet üzerinde belirleyici olduğunu

göstermiştir. Zhu vd. (2022) ise polivinil asetat emülsiyonu ile iyileştirilmiş killi zeminde %1, %2 ve %3 polimer oranlarını farklı kür koşullarında incelemiştir. Araştırmacılar polimer katkısının zemin taneleri arasında bağlayıcı köprüler oluşturduğunu ve uygun kür koşullarında polimer oranı ile kür süresindeki artışın basınç mukavemetini geliştirdiğini belirlemiştir. Bu sonuçlar polimer katkılı killi zeminlerin değerlendirilmesinde yalnızca katkı miktarının değil kür süresinin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Polimer ile kil taneleri arasındaki etkileşimin mukavemet gelişimindeki rolü daha güncel çalışmalarda mekanik ve mikroyapısal yöntemlerle de araştırılmıştır. Ghasemzadeh vd. (2020), akrilik sıvı polimer ile stabilize edilen kaolinit üzerinde farklı kür yöntemlerini inceleyerek kür koşullarının serbest basınç mukavemetini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Ghasemzadeh vd. (2022) tarafından gerçekleştirilen sonraki çalışmada ise akrilik polimer ile stabilize edilmiş kaolinit kilinin basınç mukavemeti farklı katkılarla birlikte değerlendirilmiş ve kil ile polimer arasındaki etkileşimin mekanik davranış üzerindeki önemi ortaya konulmuştur. Benzer şekilde Georgees vd. (2015) polimer esaslı bir stabilizatörün zeminlerin serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisini inceleyerek polimer katkısının mekanik davranış üzerinde belirgin değişimler meydana getirebildiğini göstermiştir.

Vinil asetat esaslı polimerlerin zemin iyileştirmede kullanılması da son yıllarda üzerinde durulan araştırma konularından biridir. Song vd. (2019) vinil asetat esaslı polimer ile gerçekleştirdikleri laboratuvar ve arazi deneylerinde polimer katkısının zemin özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılabileceğini göstermiştir. Daha yakın tarihli bir çalışmada vinil asetat etilen esaslı sıvı polimer ile iyileştirilen killi zeminde polimer oranı ve kür süresinin serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Mukavemet gelişiminin özellikle ilk 14 günlük kür süresinde belirgin olduğu ve 21 ile 28 gün arasında daha kararlı bir düzeye ulaştığı belirlenmiştir (Luan vd., 2023). Saberian vd. (2024) tarafından vinil asetat etilen kopolimer ile şişen kil üzerinde gerçekleştirilen çalışma da bu tür polimerlerin killi zeminlerin mekanik ve mikroyapısal özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Son dönemde çevresel etkileri daha düşük polimerlerin killi zeminlerde kullanılması üzerine de çalışmalar yoğunlaşmıştır. Cheng ve Geng (2023), altı farklı biyopolimer ile iyileştirilen kaolinit kilinin serbest basınç mukavemetini incelemiş ve en uygun polimer oranının genel olarak %1 ile %2 aralığında olduğunu belirlemiştir. Ayrıca 28 ile 42 günlük kür sürelerinde daha yüksek iyileştirme performansı elde edilmiştir. Yüksek plastisiteli kil üzerinde gerçekleştirilen güncel bir çalışmada ise farklı biyopolimerlerin tamamında polimer oranındaki artışla serbest basınç mukavemetinin önce arttığı, optimum katkı oranından sonra ise azaldığı belirlenmiştir. Bu çalışmada optimum katkı oranı kullanılan biyopolimer türüne bağlı olarak %0,5 ile %1,5 arasında değişmiştir (Azimi vd., 2024). Çetin vd. (2024) tarafından kil zemin üzerinde biyopolimer ve ferrokrom cürufu kullanılarak gerçekleştirilen çalışma da alternatif polimer esaslı katkıların killi zeminlerin geoteknik özelliklerinin geliştirilmesindeki potansiyelini desteklemektedir.

Literatürdeki çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde polimer katkılarının killi zeminlerin mukavemet özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte mukavemetin artışı kullanılan polimerin türüne, zeminin özelliklerine, katkı oranına ve kür süresine önemli ölçüde bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle polimer oranının artmasıyla mukavemetin sürekli olarak artmaması ve belirli bir katkı oranından sonra azalabilmesi, optimum polimer oranının deneysel olarak belirlenmesini

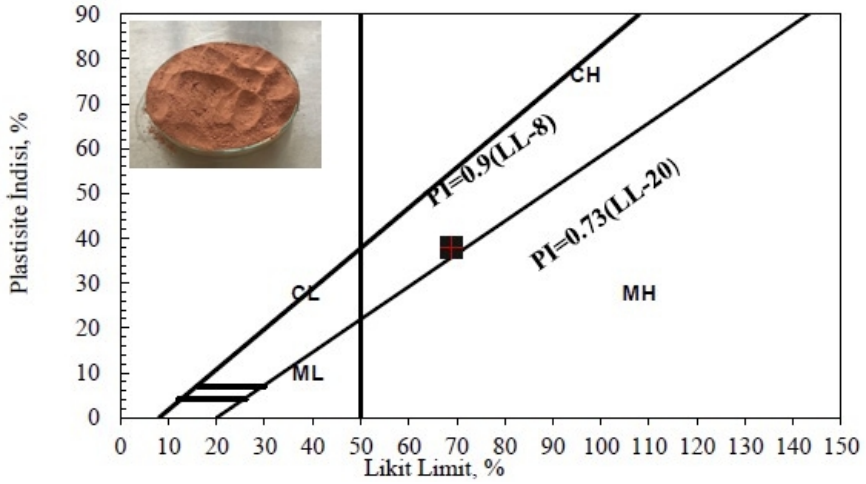
gerekli kılmaktadır. Bu çalışmada yüksek plastisiteli bir kil zeminin sıvı vinil asetat esaslı kopolimer kullanılarak iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda zemine kuru zemin ağırlığının %1, %2, %3 ve %4'ü oranlarında polimer ilave edilmiş ve hazırlanan numunelerin 3, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonundaki serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Böylece polimer oranı ve kür süresinin yüksek plastisiteli kil zeminin mukavemet davranışı üzerindeki etkileri deneysel olarak değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Kil Zeminin Özellikleri

Deneysel çalışmada kullanılan kil zemin Erzurum ili Oltu Narman Havzasından temin edilmiştir. Zemin numunesi laboratuvar ortamında 105 °C sıcaklıkta etüvde kurutulmuş ve ardından öğütülerek 40 No.lu elekten geçirilmiştir. Zeminin temel geoteknik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla dane özgül yoğunluğu, tane çapı dağılımı, kıvam limitleri ve standart Proktor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Dane özgül yoğunluğu ASTM D854-14 standardına göre belirlenmiştir. Tane çapı dağılımının belirlenmesinde elek analizi ile birlikte ince daneli fraksiyon için ASTM D422 standardına göre hidrometre deneyi uygulanmıştır. Likit limit ve plastik limit değerleri ise ASTM D4318 standardına göre belirlenmiştir.

Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre deneylerde kullanılan zemin yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılmıştır. Zeminin plastisite özelliklerine göre sınıflandırılması Şekil 1'de gösterilmiş, belirlenen temel geoteknik özellikleri ise Tablo 1'de sunulmuştur.



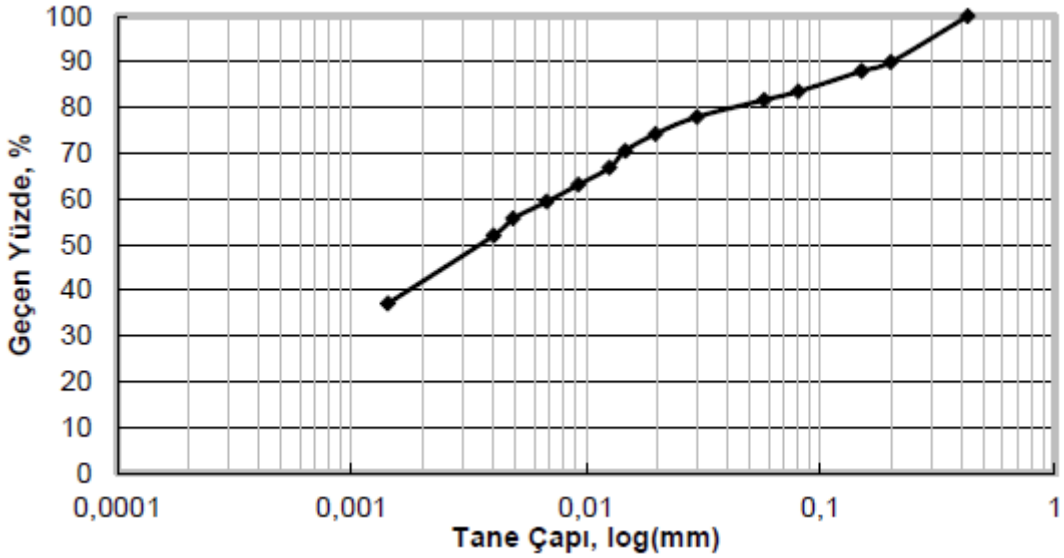
Şekil 1. Kil zeminin plastisite özelliklerine göre sınıflandırılması

Tablo 1. Doğal kile ait özellikler

Özellik	Değer
Dane özgül yoğunluğu, Gs	2.60
Doğal su muhtevası	%18

Likit limit	%69
Plastik limit	%31
Plastisite indisi	%38
Zemin sınıfı	CH

Zeminin tane çapı dağılımı elek analizi ve hidrometre deneyi sonuçları birlikte değerlendirilerek elde edilmiş olup tane çapı dağılım eğrisi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Dane çapı dağılım eğrisi

2.2. Polimer Özellikleri

Zemin stabilizasyonunda sıvı formda vinil asetat esaslı bir kopolimer kullanılmıştır. Kullanılan polimer tamamen suda çözünebilen bir kopolimer emülsiyonudur (Şekil 3). Malzemenin özgül ağırlığı 1.05 ile 1.10 arasında, pH değeri ise 4.5 ile 6.0 arasındadır. Polimerin kimyasal içeriğinde yaklaşık %50 ile %60 oranında vinil asetat kopolimer ve %40 ile %50 oranında su bulunmaktadır.



Şekil 3. Deneylerde kullanılan polimer

Polimer stabilizatörler zemin tanelerinin yüzeylerini kaplayarak zemin ile polimer arasında bir matris oluşturabilmektedir. Emülsiyon içerisindeki suyun uzaklaşmasıyla birlikte zemin taneleri arasında fiziksel bağların gelişmesi mümkün olmaktadır. Bu bağlanma mekanizmasının polimer katkılı zeminlerin mekanik davranışındaki değişimde etkili olduğu değerlendirilmektedir.

2.3. Numunelerin Hazırlanması

Polimer katkısının yüksek plastisiteli kil zeminin mukavemet davranışı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla katkısız ve farklı oranlarda polimer içeren numuneler hazırlanmıştır. Sıvı polimer kuru zemin ağırlığının %1, %2, %3 ve %4'ü oranlarında zemine ilave edilmiştir. Numuneler P0, P1, P2, P3 ve P4 olarak adlandırılmıştır. P0 katkısız zemini, P1 %1 polimer katkılı zemini, P2 %2 polimer katkılı zemini, P3 %3 polimer katkılı zemini ve P4 %4 polimer katkılı zemini ifade etmektedir. Her polimer oranı için standart Proktor deneyi gerçekleştirilerek optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Numuneler kendi optimum su muhtevalarında standart Proktor enerjisi uygulanarak sıkıştırılmıştır. Deney gruplarının karışım oranları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Deney gruplarının karışım oranları

Deney grubu	Kil	Polimer
P0	100%	0%
P1	99%	1%
P2	98%	2%
P3	97%	3%
P4	96%	4%

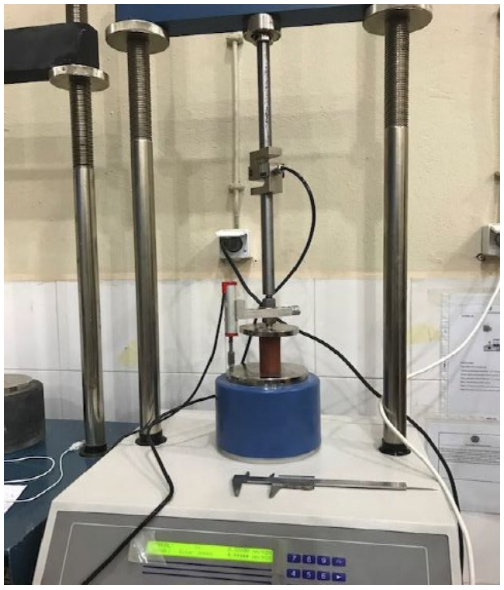
2.4. Standart Proktor Deneyi

Katkısız ve polimer katkılı zeminlerin kompaksiyon özelliklerinin belirlenmesi amacıyla standart Proktor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler ASTM D698-12 standardı esas alınarak yapılmıştır. Zemin farklı su muhtevalarında hazırlanarak kompaksiyon kalıbına üç tabaka halinde yerleştirilmiş ve her tabakaya 25 vuruş uygulanmıştır. Elde edilen su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerleri kullanılarak kompaksiyon eğrileri oluşturulmuş, her deney grubu için optimum su muhtevası ile maksimum kuru birim hacim ağırlık belirlenmiştir.

2.5. Serbest Basınç Deneyi

Polimer oranı ve kür süresinin zemin mukavemeti üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler ASTM D2166-16 standardı esas alınarak yapılmıştır. Her deney grubu kendi optimum su muhtevasında standart Proktor enerjisi ile sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numunelerden 35 mm çapında ve 70 mm yüksekliğinde silindirik deney numuneleri hazırlanmıştır.

Katkısız numunenin serbest basınç mukavemeti numune hazırlandıktan sonra belirlenmiştir. Polimer katkılı numuneler ise %1, %2, %3 ve %4 katkı oranlarının her biri için laboratuvar ortamında (23±2°C sıcaklık ve %20 nem oranı) 3, 7 ve 28 günlük kür sürelerine bırakılmıştır. Kür sürelerinin tamamlanmasının ardından numuneler serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney sırasında düşey yük yük hücresi yardımıyla, düşey deformasyon ise LVDT kullanılarak ölçülmüştür. Yükleme hızı 0,8 mm/dk olarak uygulanmıştır (Şekil 4). Elde edilen sonuçlar kullanılarak polimer oranının ve kür süresinin yüksek plastisiteli kil zeminin serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

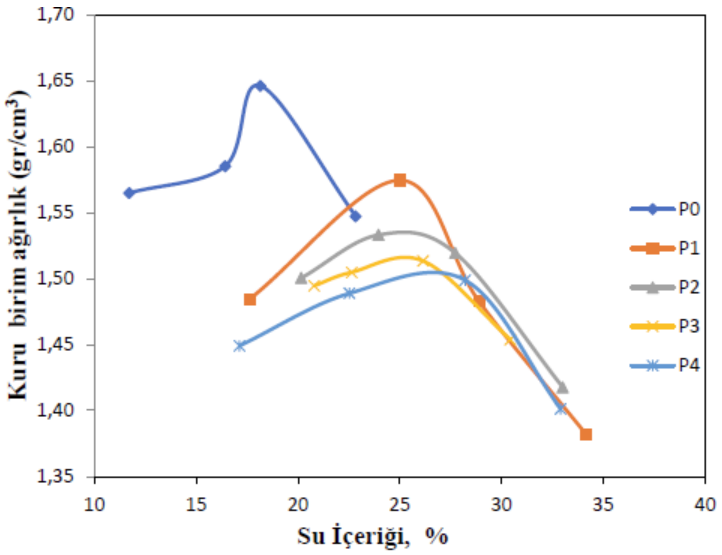


Şekil 4. Serbest basınç deneyi

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

3.1. Kompaksiyon Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Katkısız ve polimer katkılı numuneler üzerinde gerçekleştirilen standart Proktor deneyleri sonucunda her deney grubu için optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Deneylerden elde edilen kompaksiyon eğrileri Şekil 5'te, belirlenen kompaksiyon parametreleri ise Tablo 3'de sunulmuştur. Kompaksiyon eğrileri incelendiğinde polimer ilavesiyle eğrilerin genel olarak daha yüksek su muhtevası ve daha düşük kuru birim hacim ağırlık bölgesine yöneldiği görülmektedir. Katkısız zemine polimer ilave edilmesi optimum su muhtevasında artışa neden olurken maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Polimer katkılı numuneler kendi aralarında değerlendirildiğinde optimum su muhtevasındaki değişimin katkı oranıyla doğrusal bir eğilim göstermediği, maksimum kuru birim hacim ağırlığın ise polimer oranındaki artışla birlikte azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 5. Katkısız ve polimer katkılı numunelerin kompaksiyon eğrileri

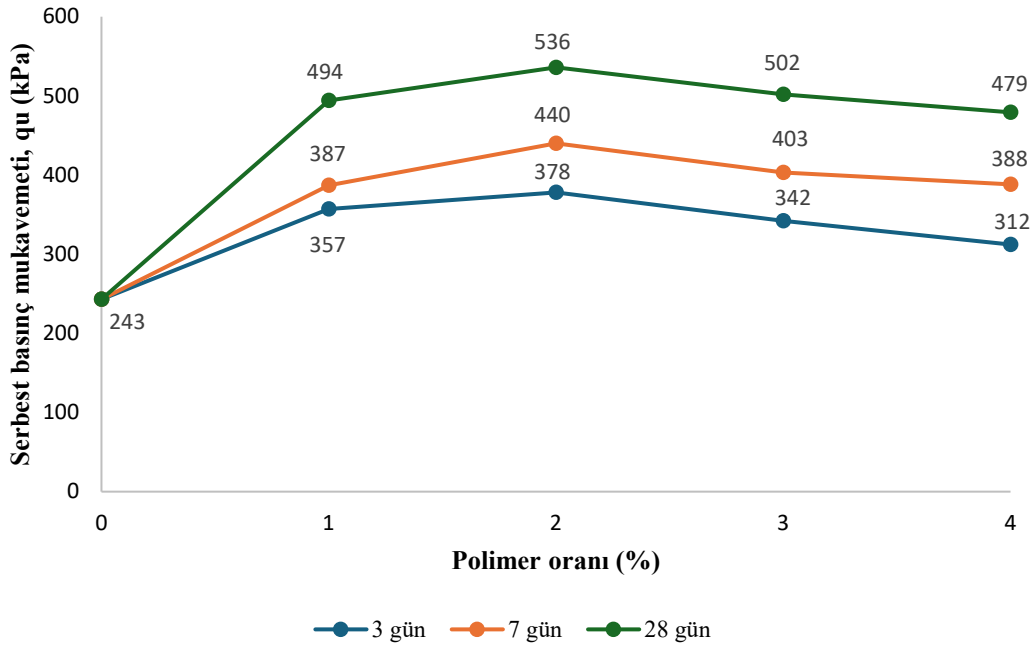
Tablo 3. Katkısız ve polimer katkılı numunelerin kompaksiyon parametreleri

Deney grubu	Polimer oranı (%)	Optimum su muhtevası (%)	Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m³)
P0	0	18	16,19
P1	1	25	15,40
P2	2	24	15,00
P3	3	25	14,91
P4	4	26	14,81

Maksimum kuru birim hacim ağırlıktaki azalma, polimer ilavesinin zemin karışımının sıkışma davranışını değiştirmesiyle ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte optimum su muhtevasındaki değişimin polimer oranıyla doğrusal olmaması, kompaksiyon davranışının yalnızca katkı oranına bağlı olarak açıklanamayacağını göstermektedir.

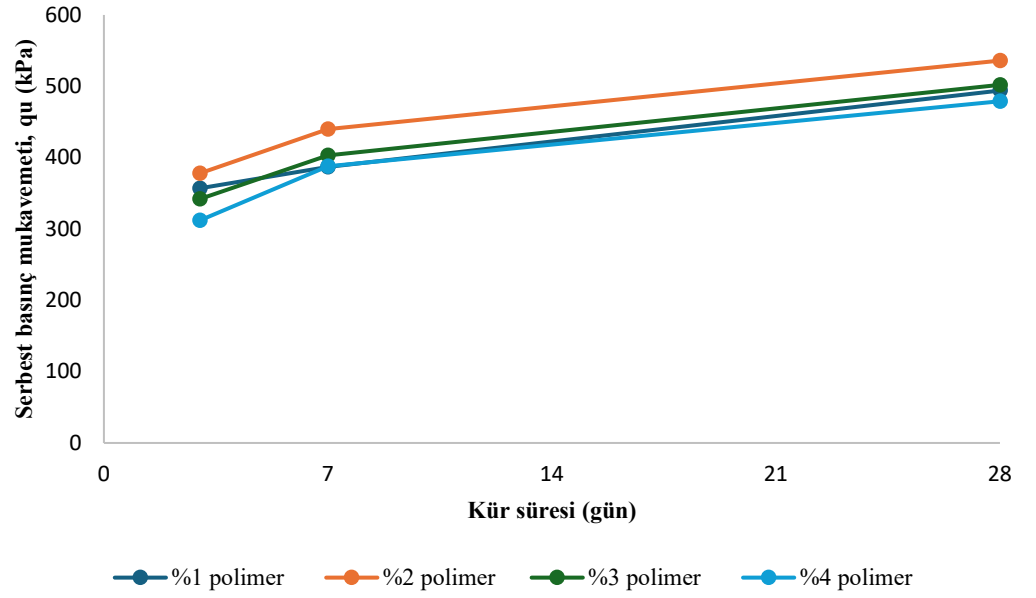
3.2. Serbest Basınç Mukavemeti Sonuçları

Serbest basınç deneyi, standart proktor enerjisinde, optimum su muhtevasında sıkıştırılan katkısız ve polimer katkılı numuneler üzerinde yapılmıştır. Serbest basınç deneyi sonuçları polimer oranı ve kür süresi dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Polimer oranına bağlı serbest basınç mukavemeti değişimi Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Polimer oranına bağlı serbest basınç mukavemeti değişimi

Şekil 6 incelendiğinde tüm kür sürelerinde polimer katkılı numunelerin katkısız zemine göre daha yüksek serbest basınç mukavemeti değerlerine ulaştığı görülmektedir. Polimer katkılı numuneler arasında her üç kür süresinde de en yüksek mukavemet değerleri %2 polimer oranında elde edilmiş, bu oranın üzerindeki katkı oranlarında ise mukavemet değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Kür süresine bağlı değişim ise Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Kür süresine bağlı serbest basınç mukavemeti değişimi

Kür süresinin serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi Şekil 7'de açık biçimde görülmektedir. Polimer katkılı bütün deney gruplarında kür süresinin artmasıyla mukavemet değerleri artmış ve en yüksek değerler 28 günlük kür süresi sonunda elde edilmiştir. Bu davranış, kür süresince polimer ile zemin taneleri arasındaki bağların gelişmesi ve zemin içerisinde daha kararlı bir yapının oluşmasıyla ilişkilendirilebilir. Özellikle uzun kür süresinde gözlenen mukavemet gelişimi, polimer stabilizasyonunda yalnızca katkı oranının değil kür süresinin de önemli bir parametre olduğunu göstermektedir.

Deney sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde polimer ilavesinin kil zeminin serbest basınç mukavemeti üzerinde belirgin bir iyileştirme sağladığı görülmektedir. Tüm polimer oranlarında elde edilen mukavemet değerlerinin katkısız zeminden daha yüksek olması, kullanılan sıvı polimerin zemin taneleri arasındaki bağlanmayı geliştirerek mekanik davranış üzerinde olumlu bir etki oluşturduğunu göstermektedir. Bununla birlikte mukavemet gelişiminin polimer oranıyla doğrusal olarak değişmediği belirlenmiştir. Polimer oranının artırılmasıyla mukavemet başlangıçta yükselmiş ve %2 katkı oranında en yüksek seviyesine ulaşmıştır. Polimer miktarının bu oranın üzerine çıkarılması ise ilave bir mukavemet artışı sağlamamış, aksine serbest basınç mukavemetinde azalmaya neden olmuştur. Bu nedenle incelenen yüksek plastisiteli kil zemin için %2 polimer oranının mukavemet açısından optimum katkı oranı olduğu belirlenmiştir.

Polimer oranına bağlı olarak ortaya çıkan optimum katkı davranışı literatürdeki bulgularla da uyumludur. Naeini vd. (2012) polimer ile iyileştirilmiş killi zeminlerde mukavemet gelişiminin polimer miktarına bağlı olduğunu ve belirli bir katkı oranından sonra polimer miktarının artırılmasının aynı düzeyde bir mukavemet gelişimi sağlamadığını bildirmiştir. Kolay vd. (2016) de sıvı akrilik polimer ile iyileştirilmiş ince daneli zeminlerde polimer oranının mekanik davranış üzerinde belirleyici olduğunu ve iyileştirme düzeyinin zemin özelliklerine bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuştur. Benzer şekilde Cheng ve Geng (2023), polimer ile iyileştirilen kil zeminde belirli bir optimum katkı oranının bulunduğunu ve bu oranın üzerinde polimer kullanımının mukavemet açısından ilave bir avantaj sağlamayabileceğini belirtmiştir.

Kür süresiyle birlikte gözlenen mukavemet artışı da daha önce gerçekleştirilen çalışmalarla benzerlik göstermektedir. Rezaeimalek vd. (2018) ve Ghasemzadeh vd. (2020), sıvı polimerlerle stabilize edilen killi zeminlerde kür koşullarının mukavemet gelişimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Zhu vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada da polimer katkılı killi zeminlerin basınç mukavemetinin kür süresine bağlı olarak geliştiği belirlenmiştir. Bu durum polimer ile zemin taneleri arasındaki etkileşimin zaman içerisinde gelişmeye devam ettiğini ve kür süresinin polimer stabilizasyonunun performansını belirleyen temel değişkenlerden biri olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak Şekil 6 ve Şekil 7 birlikte değerlendirildiğinde kullanılan sıvı polimerin yüksek plastisiteli kil zeminin serbest basınç mukavemetini önemli ölçüde geliştirdiği, ancak bu iyileşmenin polimer miktarının sürekli artırılmasıyla devam etmediği görülmektedir. Elde edilen sonuçlar mukavemet açısından en uygun katkı oranının %2 olduğunu ve kür süresindeki artışın tüm polimer oranlarında mukavemet gelişimine olumlu katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada yüksek plastisiteli kil zeminin sıvı vinil asetat esaslı kopolimer ile iyileştirilmesi araştırılmış ve farklı polimer oranları ile kür sürelerinin serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen deneysel bulgular doğrultusunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Polimer ilavesi zeminin kompaksiyon davranışında belirgin değişime neden olmuştur. Katkısız zemine polimer ilave edilmesiyle optimum su muhtevası artarken maksimum kuru birim hacim ağırlık azalmıştır. Polimer katkılı numunelerde optimum su muhtevası katkı oranıyla doğrusal bir değişim göstermemiş, maksimum kuru birim hacim ağırlık ise polimer oranındaki artışla azalma eğilimi göstermiştir.

- İncelenen tüm polimer oranlarında elde edilen serbest basınç mukavemeti değerleri katkısız zeminden daha yüksek bulunmuştur. Bununla birlikte mukavemet artışının polimer oranıyla doğrusal olmadığı belirlenmiştir.

- Her üç kür süresinde de en yüksek serbest basınç mukavemeti değerleri %2 polimer katkılı numunelerde elde edilmiştir. Polimer oranının %2'nin üzerine çıkarılması ilave bir mukavemet artışı sağlamamış ve %3 ile %4 katkı oranlarında serbest basınç mukavemeti değerleri azalmıştır.

- Kür süresinin artması bütün polimer katkı oranlarında serbest basınç mukavemetini olumlu yönde etkilemiştir. En yüksek mukavemet değerleri 28 günlük kür süresi sonunda elde edilmiş ve polimer ile zemin taneleri arasındaki bağlanmanın zamanla geliştiği görülmüştür.

- Çalışmada ölçülen en yüksek serbest basınç mukavemeti %2 polimer katkılı ve 28 gün kür uygulanmış numunede 536 kPa olarak belirlenmiştir. Bu değer katkısız zemine göre %120,6 oranında artışa karşılık gelmektedir.

Genel olarak elde edilen sonuçlar, sıvı vinil asetat esaslı kopolimerlerin yüksek plastisiteli killi zeminlerin mukavemet özelliklerinin geliştirilmesinde alternatif bir stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte polimer stabilizasyonunun performansının katkı oranı ve kür süresine bağlı olduğu, bu nedenle uygulama öncesinde zemine özgü optimum polimer oranının deneysel olarak belirlenmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

Azimi, M., Soltani, A., Mirzababaei, M., Jaksa, M.B. ve Ashwath, N. (2024), "Biopolymer Stabilization of Clayey Soil", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol 16(7), 2801-2812. DOI: 10.1016/j.jrmge.2023.12.020.

Cheng, Z. ve Geng, X. (2023), "Investigation of Unconfined Compressive Strength for Biopolymer Treated Clay", Construction and Building Materials, Vol 385, 131458. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131458.

Çetin, M.Y., Bağrıaçık, B., Annagür, H.M. ve Topoliński, S. (2024), "Improvement of Geotechnical Properties of Clayey Soil Using Biopolymer and Ferrochromium Slag Additives", Polymers, Vol 16(10), 1306. DOI: 10.3390/polym16101306.

Georgees, R.N., Hassan, R.A., Evans, R.P. ve Jegatheesan, P. (2015), "Effect of the Use of a Polymeric Stabilizing Additive on Unconfined Compressive Strength of Soils", Transportation Research Record, Vol 2473(1), 200-208. DOI: 10.3141/2473-23.

Ghasemzadeh, H., Mehrpajouh, A., Pishvaei, M. ve Mirzababaei, M. (2020), "Effects of Curing Method and Glass Transition Temperature on the Unconfined Compressive Strength of Acrylic Liquid Polymer-Stabilized Kaolinite", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol 32(8), 04020212. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003287.

Ghasemzadeh, H., Mehrpajouh, A. ve Pishvaei, M. (2022), "Compressive Strength of Acrylic Polymer-Stabilized Kaolinite Clay Modified with Different Additives", ACS Omega, Vol 7(23), 19204-19215. DOI: 10.1021/acsomega.2c00236.

Kolay, P.K., Dhakal, B., Kumar, S. ve Puri, V.K. (2016), "Effect of Liquid Acrylic Polymer on Geotechnical Properties of Fine-Grained Soils", International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, Vol 2, 29. DOI: 10.1007/s40891-016-0071-5.

Luan, Y., Ma, X., Ma, Y., Liu, X., Jiang, S. ve Zhang, J. (2023), "Research on Strength Improvement and Stabilization Mechanism of Organic Polymer Stabilizer for Clay Soil of Subgrade", Case Studies in Construction Materials, Vol 19, e02397. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02397.

Naeini, S.A., Naderinia, B. ve Izadi, E. (2012), "Unconfined Compressive Strength of Clayey Soils Stabilized with Waterborne Polymer", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol 16(6), 943-949. DOI: 10.1007/s12205-012-1388-9.

Newman, K. ve Tingle, J.S. (2004), "Emulsion Polymers for Soil Stabilization", FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, Atlantic City, New Jersey.

Onyejekwe, S. ve Ghataora, G.S. (2015), "Soil Stabilization Using Proprietary Liquid Chemical Stabilizers: Sulphonated Oil and a Polymer", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol 74(2), 651-665. DOI: 10.1007/s10064-014-0667-8.

Rezaeimalek, S., Nasouri, R., Huang, J. ve Bin-Shafique, S. (2018), "Curing Method and Mix Design Evaluation of a Styrene-Acrylic Based Liquid Polymer for Sand and Clay Stabilization", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol 30(9), 04018200. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002396.

Saberian, M., Perera, S.T.A.M., Zhu, J., Roychand, R. ve Li, J. (2024), "Investigating the Impact of Vinyl Acetate-Ethylene Polymer on the Mechanical and Microstructural Properties of Expansive Clay Subgrade", Road Materials and Pavement Design, Vol 25(11), 2436-2459. DOI: 10.1080/14680629.2024.2320876.

Song, Z., Liu, J., Bai, Y., Wei, J., Li, D., Wang, Q. ve Qian, W. (2019), "Laboratory and Field Experiments on the Effect of Vinyl Acetate Polymer-Reinforced Soil", Applied Sciences, Vol 9(1), 208. DOI: 10.3390/app9010208.

Tingle, J.S., Newman, J.K., Larson, S.L., Weiss, C.A. ve Rushing, J.F. (2007), "Stabilization Mechanisms of Nontraditional Additives", Transportation Research Record, Vol 1989(1), 59-67.

Zhu, X., Liu, J., Xue, J., Zhang, F., Chen, Z., Hu, G. ve Jiang, C. (2022), "Effect of Curing Condition on the Compressive Mechanical Behavior of Clayey Soil Stabilized with Liquid Polymer", International Journal of Polymer Science, Vol 2022, 9031369. DOI: 10.1155/2022/9031369.