



## ENDÜSTRİYEL ATIKSULARIN KİLLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Ömür ÇİMEN<sup>1\*</sup>, Ebru YALVAÇ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup>Ekinoks Tehlikeli Madde Güvenlik Danışmanlığı, Antalya, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

Zemin İyileştirme,  
Killer,  
Endüstriyel Atıksular,  
Kıvam Limitleri,  
Şişme Basıncı.

### Öz

Bu çalışmada, Isparta ve civarında bulunan dört farklı endüstriyel atıksuyun iki farklı kil zeminin bazı mühendislik özelliklerine olan etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla kıvam limitleri, standart kompaksiyon ve sabit hacimli şişme deneyleri musluk suyu kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra aynı deneyler dört farklı endüstriyel atıksu kullanılarak tekrar yapılmıştır. Yapılan deneylere göre killerin kıvam limitlerinin, kompaksiyon parametrelerinin ve şişme basıncı değerinin kullanılan atıksularla değiştiği görülmüştür. Atıksular kullanıldığında her iki zemin türü için de, maksimum kuru birim hacim ağırlığının arttığı, likit limitin, plastik limitin, plastisite indisinin, optimum su muhtevasının ve şişme basıncının azaldığı görülmüştür. Endüstriyel atıksuların özelliklerinin her gün değişiklik göstermesi sebebiyle deney sonuçlarının değerlendirilmesinde daha fazla deney sonucuna ihtiyaç olduğu göz önünde tutulmalıdır.

## AFFECTION TO ENGINEERING PROPERTIES OF CLAYS AT INDUSTRIAL WASTEWATERS

### Keywords

Soil Improvement,  
Clays,  
Industrial Wastewater,  
Consistency Limits,  
Swelling Pressure.

### Abstract

In this study, the effects of four different industrial wastewaters in Isparta and its surroundings on some engineering properties of two different clay soils were investigated. For this purpose, consistency limits, standard compaction and constant volume swelling experiments were carried out using tap water. Later, the same experiments were conducted again using four different industrial wastewater. According to the experiments, it has been observed that the consistency limits, compaction parameters and swelling pressure values of clays vary with the wastewater used. It was observed with the experiments that liquid limit, plastic limit, plasticity indices, optimum water content and maximum dry unit volume weight depends on used wastewater. Since the characteristics of industrial wastewater change every day, it should be taken into consideration that more test results are needed when evaluating the test results.

### Alıntı / Cite

Çimen, Ö., Yalvaç, E., (2024). Endüstriyel Atıksuların Killerin Mühendislik Özelliklerine Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(1), 255-264.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Ö. Çimen, 0000-0002-6138-6029  
E. Yalvaç, 0000-0002-3805-8764

### Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	24.10.2023
Revizyon Tarihi / Revision Date	13.02.2024
Kabul Tarihi / Accepted Date	06.03.2024
Yayın Tarihi / Published Date	25.03.2024

\* İlgili yazar / Corresponding author: omurcimen@sdu.edu.tr, +90-246-211-1202

## AFFECTION TO ENGINEERING PROPERTIES OF CLAYS AT INDUSTRIAL WASTEWATERS

Ömür ÇİMEN<sup>†</sup>, Ebru YALVAÇ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Suleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Civil Engineering, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup> Ekinoks Dangerous Goods Safety Consultancy, Antalya, Türkiye

---

### Highlights

- Effect of wastewater on engineering properties of clays
- Industrial wastewater in Isparta and its surroundings
- Investigation of the use of wastewater in soil stabilization

---

### Purpose and Scope

It is known that the engineering behavior of clays varies depending on the amount of water they contain and the properties of the water. It has been stated in many studies that when pure water or tap water is used to determine the geotechnical characteristics of clays, very different results are obtained from the field conditions, and therefore, it is necessary to investigate the changes in engineering properties with chemical water in determining the engineering properties of compressed clays.

### Design/methodology/approach

In this study, the effects of four different industrial wastewaters on the engineering properties of high and low plasticity clay soils in Isparta were investigated. These wastewaters are identified with the symbols A, B, C, D. A: Wastewater generated during marble cutting from the marble factory, B: The outlet water of the facility where Organized Industrial Wastewater, which contains the wastewater of 40 different factories, is collected and treated, C: Wastewater treatment plant effluent where Isparta city wastewater is collected, D: Kovada Canal water contaminated with agricultural pesticides. For this purpose, the consistency limits, standard compaction, and constant volume swelling test results made with tap water were compared with the test results made with four different industrial wastewater. Values of pH, conductivity, Chemical Oxygen Demand (COD) together with anion and cation analysis values of the water used were determined. Soil classes of the used soils were determined according to the Unified Classification System. Maximum dry unit weight and optimum water content were determined by standard compaction tests. Constant volume swelling experiments were performed on samples prepared under compaction conditions. All experiments were repeated using wastewater.

### Findings

It has been determined that wastewater reduces the liquid limit, plastic limit, plasticity index, optimum water content, and swelling pressure of high plasticity clay, and increases the maximum dry unit volume weight. It has been observed that the wastewater that has the most impact on the consistency limits and swelling pressure of high plasticity clay is the marble factory wastewater shown as A. The wastewater that increased the maximum dry unit volume weight the most and reduced the optimum water content the most was Organized Industrial Wastewater, indicated by B. While it is thought that Ca and HCO<sub>3</sub> ions, which are abundant in Organized Industrial wastewater, are effective in increasing dry unit volume weight and reducing the optimum water content; It is thought that Mg, Na, K, Si, Cl and SO<sub>4</sub> ions, which are abundant in marble wastewater, reduce the consistency properties and swelling pressure. It has been determined that wastewater reduces the liquid limit, plastic limit, plasticity index, optimum water content and swelling pressure of low plasticity clay, and increases the maximum dry unit volume weight. In the consistency limits tests of low plasticity clay, the most effective wastewater was the Organized Industrial wastewater shown as B, while the most effective wastewater on the swelling pressure was the marble factory wastewater shown as A.

### Originality

There is no detailed study on the effects of wastewater on the ground in Isparta and its surroundings. It is clear that the use of wastewater in soil stabilization will also contribute to the environment. It is thought that this study, conducted on a limited number of samples, will contribute to the literature.

---

<sup>†</sup> İlgili yazar / Corresponding author: omurcimen@sdu.edu.tr, +90-246-211-1202

## 1. Giriş (Introduction)

Esas mineralin türü, çökeltme ortamındaki özellikler (iyon miktarı, sıcaklık, pH vb. ) kil minerallerinin oluşumunu etkilemektedir. Özgül yüzeylerinin büyük olması nedeniyle kil minerallerinin su tutma kapasitesi de büyüktür. Montmorillonit kil mineralinin en yüksek su tutma kapasitesine sahip olduğu bilinmektedir. Bu mineralin kil içerisinde bulunma durumu ve çokluğu da kilin suya maruz kalması durumundaki davranışını çok fazla etkilemektedir (Shoaib vd., 2022).

Kil zeminlerin su muhtevsındaki değişiklikler ve suyun özellikleri kilin mühendislik davranışının değişmesine neden olmaktadır. Killerin geoteknik karakteristiklerinin belirlenmesinde saf su veya musluk suyu kullanıldığında arazideki durumlardan çok farklı sonuçlar elde edildiği, bu sebeple sıkıştırılmış killerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde kimyasal sular ile mühendislik özelliklerin değişiminin araştırılmasının bir gereklilik olduğu belirtilmiştir (Yılmaz vd., 2008; Arasan, 2010).

Killi zeminler inşaat mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kullanım sırasında zemin çeşitli maddelerin etkisinde kalmaktadır. Bu maddelerin başında sıvı ve katı atıklar ile zemin özelliklerini iyileştirmek için kullanılan katkı malzemeleri gelmektedir. Katı atık depo alanlarında kullanılan kil tabakaları da atık sulara maruz kalarak kirlenmekte ve killerin mühendislik özellikleri değişmektedir (Taşköy, 2006). Akyıldız (2011), katı atık düzenli depolama alanlarında taban geçirimsizliğine etki eden parametrelerin araştırılması amacıyla yüksek plastisiteli ve düşük plastisiteli zeminler üzerinde permeabilite deneyleri yapmıştır. Bu malzemelerin farklı sıvılara (saf su, katı atık sızıntı suyu) maruz kaldıklarında ve farklı sıkıştırma durumunda göstermiş oldukları geçirimsizlikler tespit edilmiştir. Katı atık düzenli depolama alanlarında en iyi permeabilitenin sağlanması için sıkıştırmanın da en uygun şekilde yapılması gerektiğini vurgulamıştır. Temiz suya ulaşmak her geçen gün zorlaşmaktadır. Atıksuların farklı alanlarda değerlendirilmesinin araştırılmasıyla daha az temiz suyun kullanılmasının amaçlanması gerekmektedir. Killerin mühendislik özelliklerinin suyun özelliklerinden etkilendiği bilinmektedir. Atıksulara maruz kalan killerin veya dolguda kullanılan killerin sıkıştırılmasında atıksuların kullanılmasında mühendislik özelliklerindeki olumlu/olumsuz değişimlerin tahmin edilmesi de bir gerekliliktir.

Atıksuların killerin mühendislik özelliklerine olan etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada; Tekstil, tabakhane ve pil endüstriyel atıksuları farklı oranlarda karıştırılarak kullanılmıştır. Tekstil ve tabakhane atıksularıyla yapılan likit limit deneylerinde atıksu konsantrasyonunun artmasıyla likit limitin, plastik limitin ve şişme basıncının azaldığı, pil atıksuyu ile yapılanlarda ise konsantrasyonunun artmasıyla likit limitin, plastik limitin ve şişme basıncının arttığı belirlenmiştir. Tekstil atıksuyundaki kloritin kilin çift tabakasını azalttığı bu azalmanın da kıvam limitlerinde azalmaya neden olduğu, tabakhane atıksuyunun kıvam limitlerini azaltması ise atıksuda bulunan kromyum iyonlarının adsorbsiyonundan kaynaklandığı belirtilmiştir. Pil atıksuyu kullanıldığında kıvam limitlerinin artması ise atıksuda bulunan sülfatın adsorbsiyonundan kaynaklandığı, bunun sonucunda çift tabakanın genişlemesinin kıvam limitlerinde artmaya neden olduğu şeklinde açıklanmıştır (Rao ve Chittaranjan, 2012 ). Kemerköy çöp suyunun değişik konsantrasyonlarda kullanıldığı bir çalışmada, zemindeki çöp suyu konsantrasyonu yükseldikçe likit limit ve plastisite indisinin de yükseldiği belirtilmiştir (Erken vd., 2006).

Tuz solüsyonunun konsantrasyonu artarken düşük plastisiteli kilerde likit ve plastik limitin arttığı gösterilmiştir (Arasan ve Yetimoğlu, 2006; 2008). Bu çalışmalardan farklı olarak, kaolinin likit limitinin CaCl solüsyonunun konsantrasyonundan etkilenmediği, plastisite indisini ise azalttığı belirtilmiştir (Park vd., 2006). NaCl konsantrasyonunun artmasıyla bentonitin likit limiti çok fazla azalırken, plastik limiti çok az artmaktadır (Shirazi vd., 2011). NaCl-Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltileri kullanıldığında, bentonit-kum karışımının likit ve plastik limitinin artan çözelti konsantrasyonu ile azaldığı gösterilmiştir (Zhang vd., 2012). Magnezyum hidroksit, deniz suyu ve zeytinyağı fabrikası atıksuyunun bentonitin şişme potansiyeli ve plastisitesini azalttığı belirtilmiştir (Urena vd., 2013). Etilen glikol, toulen ve doğal deniz suyunun plastisite ve şişme potansiyeline etkisinin araştırıldığı çalışmada ise saf toulen ve deniz suyunun plastisitenin ve şişme potansiyelinin azalmasına neden olduğu gösterilmiştir (Mosavat ve Nalbantoglu, 2013).

Bu çalışmada, Isparta ve civarında bulunan endüstriyel atıksuların yüksek ve düşük plastisiteli killi zeminlerin bazı mühendislik özellikleri üzerindeki olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, kıvam limitleri, standart kompaksiyon ve standart kompaksiyon şartlarında hazırlanan numuneler üzerinde sabit hacimli şişme deneyleri yapılmıştır. Atıksular kullanılarak yapılmış deney sonuçları, temiz su kullanılarak yapılan deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

## 2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Killerin şişme davranışı; kil minerallerinin cinsleri ve bulunma miktarları, çökeltme ortamlarındaki oluşum farklılıkları gibi özelliklerden etkilenmektedir. Montmorillonit ve kaolinit, her ikisi de magmatik kayalardan ayrışmasına rağmen ayrışma koşullarındaki farklılıklar nedeniyle montmorillonitin yüksek, kaolinitin ise düşük şişme potansiyeline sahip olduğu bilinmektedir. Şişme genellikle kristallerarası şişme ve ozmotik şişme olarak iki bölümde görülür. Kristallerarası şişmeye kildeki değişebilir katyonların hidrasyonu sebep olurken, ozmotik şişmeye boşluk suyu ve kil yüzeyleri arasındaki iyon konsantrasyonları sebep olur (Savage, 2005; Quainoo vd., 2022).

Şişme özelliklerinin sıvının kimyasal özelliklerinden etkilendiği birçok çalışmada belirtilmiştir. Düşük yoğunluklarda sıkıştırılmış bentonitin şişme basıncının yeraltı suyunun tuzluluğundan çok etkilenirken, 1,5 Mg/m<sup>3</sup> den daha yüksek yoğunluklarda sıkıştırıldığında çok az etkilendiği gösterilmiştir (Dixon, 2000). Bentonitin maksimum şişme oranının 0-1 M NaCl konsantrasyonlarında hızla azaldığı, 1-4 M NaCl konsantrasyonlarında ise yavaş bir şekilde azaldığı belirtilmiştir (Shirazi vd., 2011). Bentonitin şişme basıncının farklı CaCl<sub>2</sub> konsantrasyonlarına bağlı olarak belirlendiği çalışmada konsantrasyondaki CaCl<sub>2</sub> artmasıyla şişme basıncının azaldığı belirtilmiştir (Jia ve Yang, 2010). Farklı Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> ve NaNO<sub>3</sub> konsantrasyonları kullanarak şişme deneyleri yapıldığında, şişme potansiyelinin, şişme basıncının ve şişme zamanının azaldığı gösterilmiştir (Alawaji, 1999). Yüksek plastisiteli killerde tuz solüsyonunun konsantrasyonu arttıkça şişme basıncının azaldığı gösterilmiştir (Arasan vd., 2007). Bentonitin tuzlu suyla yapılmış şişme basıncı deneylerinde elde edilen şişme basıncının saf suyla yapılandırından daha düşük olduğu gösterilmiş, potasyum ve magnezyum değişiminin şişme basıncına olan etkisinin araştırıldığı çalışmada magnezyum miktarının artmasıyla şişme basıncının azaldığı belirtilmiştir (Herbert ve Moog, 2000). Şişme basıncındaki bu azalma elektriksel çift tabakaya bitişik kuasi kristal yüzeyinin artan NaCl konsantrasyonlarıyla sıkıştırıldığı için agrega şişmesinin azalabileceği şeklinde açıklanmıştır. NaCl solüsyonu için agrega şişmesinin, hem kristal şişmesi hem de kuasi kristaller arasındaki çift tabaka şişmesi tarafından kontrol edildiği belirtilmiştir (Suzuki vd., 2005). Sıkıştırılmış bentonitin şişme basıncının değişiminin farklı Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaCl ve CaCl<sub>2</sub> konsantrasyonları kullanılarak araştırıldığı çalışmalarda, konsantrasyon oranı arttıkça şişme basıncının azaldığı, şişme basıncı üzerinde aynı konsantrasyondaki Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltilisinin diğerlerine göre daha etkili olduğu gösterilmiştir. NaCl ve CaCl<sub>2</sub> kendi aralarında değerlendirildiğinde NaCl çözeltilisinin şişme basıncını azaltmada daha etkili olduğu, bu duruma CaSO<sub>4</sub> çökmesinin neden olabileceği belirtilmiştir (Shirazi vd., 2011; Zhang vd., 2012; Zhu vd., 2013; Chen ve Huang, 2013). Yüksek yoğunluklarda ve düşük tuz konsantrasyonlu suyla sıkıştırılmış bentonitin kısa süreli (100 saat) şişme basıncına suyun kimyasal özelliklerinin değişiminin etkisi görülmezken, uzun süreli (700 saat) şişme basıncının bütün yoğunluklarda, suyun kimyasal özelliklerinin değişiminden çok etkilendiği gösterilmiştir (Wang vd., 2014). Doygun olmayan zemin davranışına atıksuyun etkisinin araştırıldığı bir çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak, düşük plastisiteli kilde atıksuyun numunenin kayma mukavemetini, şişme basıncını ve şişme yüzdesini çok fazla etkilemediği belirtilmiştir (Maaita ve Tarawneh, 2003). Boşluk suyu tuzluluğunun ve tuz değerliğinin artışıyla, killerin likit limiti azalmakta, permabilite katsayısı, konsolidasyon katsayısı, kayma dayanımı ve içsel sürtünme açısı artmakta, e-logp grafikleri aşağı yönde baskılanmaktadır (Jiang vd., 2020; Yurtcan, 2023). İyonik güçteki bir artışın, kilin Young modülünde bir azalmaya neden olduğu gösterilmiştir (Dor vd., 2020).

Abdallh (2018), kentsel atık su arıtma tesisi arıtılmış atık sularını ve stabilize arıtma çamurlarını tuzlu-sodyumlu zeminlerin stabilizasyonunda kullanmıştır. Çalışmasında, Tuzlu-sodyumlu zemin iyileştirilmesinde stabilize arıtma çamuru ve arıtılmış atık suların kullanım etkinliğinin belirlenmesi kapsamında, arıtılmış atık suların temiz su uygulamalarıyla benzer etki göstermiş olması, yıkama aşamasında temiz su kaynaklarının korunması adına orta tuzluluk ve düşük sodyumlulukta arıtılmış atık suların rahatlıkla kullanılabilmesini göstermiştir. Karabash vd. (2023), ham petrol, dizel, benzin ve gazyağı ile kirlenmiş yüksek plastisiteli kilin mühendislik özelliklerini araştırmışlardır. Bu kirlenmelerin etkisiyle maksimum kuru birim hacim ağırlıkta, kohezyonda ve serbest basınç mukavemetinde azalma meydana geldiğini, zeminin içsel sürtünme açısının, plastisitesinin, şişme yüzdesinin ve şişme basıncının arttığını belirtmişlerdir. Kuru tarafta sıkıştırıldığında permeabilite katsayısı azalırken, ıslak tarafta sıkıştırıldığında artmıştır. Yin vd. (2022), kömür suyu bulamaç gazlaştırma cürufunun Tuzlu-Alkali zeminlerine olan etkisini araştırmışlardır. Bu tür zeminlere gazlaştırma cürufunun eklenmesinin doymuş su içeriğini, kılcal su tutma kapasitesini ve saha su tutma kapasitesini artırdığını ve su tutma performansını iyileştirdiğini göstermişlerdir. Zalacain vd. (2019), çalışmalarında arıtılmış atık suyun zeminin bazı özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Zeminin penetrasyon dayanımının ve üst tabakadaki mikroagrega stabilitesinin arttığını belirtmişlerdir. Baykuş ve Karpuzcu (2021), ince taneli zeminlerin kimyasal ve fiziksel özelliklerine atık suyun etkilerini incelemişlerdir. Atık su sızdırılan zeminlerin, N ve H içeriği azalırken, Mg, Ca, P, Al, Pb, Zn ve C içerikleri, zemin tipine göre farklılık göstermiştir. Zeminlerin ince dane yüzdesi arttıkça, Na absorpsiyon kapasiteleri artmıştır. Arıtılmış atıksuların tarımsal sulamaya yönelik kullanımının, (Çay ve Kanber, 2021; Sdiri vd., 2023; Alsanad, 2023), çimento harcı üretiminde kullanımının (Yılmaz, 2016) araştırıldığı çalışmalar da mevcuttur. Atıksularla kirlenmiş zeminlerden ağır metallerin geri kazanılması ve zararlı elementlerin zeminden

uzaklaştırılmasıyla ilgili çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda kirlenmiş zeminlerin zararlı etkileri, ağır metal kaynakları ve ağır metallerle kirlenmiş zeminlere yönelik iyileştirme teknolojileri araştırılmaktadır (Li vd., 2019; Tarekegn vd., 2020; Ghiyas ve Bagheripour, 2020; Estabragh vd., 2022; Sistani vd., 2023 ). Brezilya'da Santo Amaro bölgesindeki kritik derecede kirlenmiş bir alanın toprak kazısı, yenileme ve stabilizasyon yoluyla iyileştirilmesinin tahmini maliyetinin yaklaşık 20 ila 30 milyon Amerikan Doları olduğu belirtilmiştir (Andrade Lima vd., 2018).

Atıksularla yapılan çalışmalar incelendiğinde dört gruba ayrıldığı görülmüştür. Birinci gruba gerçek atıksuların killerin mühendislik özelliklerine olan etkilerinin araştırıldığı çalışmalar girmektedir. Bu çalışmaların bir kısmında atıksular farklı konsantrasyonlarda olacak şekilde hazırlanmıştır. Bazılarında ise direk olarak kullanılmıştır. Killerin kıvam limitleri, kompaksiyon parametreleri, dane birim hacim ağırlık, dane çapı değişimi, serbest basınç mukavemeti, kayma mukavemeti parametreleri, konsolidasyon katsayısı, permeabilite katsayısı gibi temel mühendislik parametrelerinin atıksularla değişimleri araştırılmıştır. İkinci gruba yapay olarak hazırlanmış tuzlu veya asitli suların kullanıldığı çalışmalar girmektedir. Bu çalışmalarda da genellikle aynı mühendislik parametreler çalışılmıştır. İlave olarak bu çalışmalarda mikroanalizlerin daha fazla olduğu görülmüştür. Üçüncü grupta atıksularla kirlenmiş zeminlerin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar gelmektedir. Bu çalışmalarda ağır metallerin uzaklaştırılması, zeminin mekanik özelliklerini arttırmak için farklı katkı malzemeleri kullanılması gibi konular ele alınmaktadır. Dördüncü grupta ise atıksuların farklı alanlarda kullanımının araştırıldığı çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışma birinci gruba girecek bir araştırmadır. Isparta ve civarında bulunan endüstriyel atıksuların killerin bazı mühendislik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Atıksular zemine direk olarak karıştırılarak kıvam limitleri, standart kompaksiyon ve standart kompaksiyon şartlarında hazırlanan numuneler üzerinde sabit hacimli şişme deneyleri yapılmıştır.

### 3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

DeneySEL çalışmalarda Isparta ve civarında bulunan endüstriyel atıksular kullanılmıştır. Atıksuların kaynağından alınması ve deneylerde kullanılması sırasında maske ve eldiven kullanılmıştır. Bu atıksular A, B, C, D simgeleri ile tanımlanmıştır. A: Mermer fabrikasından alınan mermer kesimi sırasında ortaya çıkan atıksu, B: içerisinde 40 farklı fabrikasının atıksularının bulunduğu Organize Sanayi Atıksuyunun toplandığı ve arıtma uygulanan tesisin çıkış suyu, C: Isparta şehir atıksularının toplandığı atıksu arıtma tesisi çıkış suyu, D: Tarımsal ilaçlarla kirlenmiş Kovada Kanalı suyu. Bu atıksular ile yapılan deneyler musluk suyu ile yapılan deneylerle karşılaştırılmıştır. Kullanılan suların pH, iletkenlik ve Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) değerleri Isparta Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü Laboratuvarında APHA, (1999) standartlarına belirlenmiştir. Deney sonuçları Tablo 1' de verilmiştir.

**Tablo 1.** Kullanılan suların pH, iletkenlik ve KOİ analiz sonuçları  
(Results of conductivity, pH and KOİ of used water) (Yalvaç, 2011)

SULAR	pH	İLETKENLİK ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	KOİ (mg/l)
MUSLUK SUYU	7.33	691	5
A ATIKSUYU	7.84	2350	476
B ATIKSUYU	7.12	1817	115
C ATIKSUYU	7.13	1158	59
D ATIKSUYU	7.63	475	142

Kullanılan suların anyon ve katyon analizleri, Süleyman Demirel Üniversitesi Jeotermal Enerji, Yeraltısu ve Mineral Kaynakları Laboratuvarında, Ca, Mg, Na, K, Si, Al, Fe katyonlarının analizi Perkin Elmer Optima 2100 DV ICP-DES cihazıyla, Cl, SO<sub>4</sub> anyonlarının analizi Dionex ICS 3000 IC cihazıyla, HCO<sub>3</sub> katyonu Merck Alkalinity Test Kiti (titrasyon yöntemiyle) 1.11109 kodlu kit kullanılarak yapılmıştır. Katyon analizi deney sonuçları (Ca, Mg, Na, K, Si, Fe, Al ) ve anyon analizi deney sonuçları (HCO<sub>3</sub>, Cl , SO<sub>4</sub> ) Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Kullanılan suların katyon ve anyon analiz sonuçları  
(Results of cation and anion analyses of samples)(Yalvaç, 2011)

SULAR	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Si (mg/l)	Fe (mg/l)	Al (mg/l)	HCO <sub>3</sub> (mg/l)	Cl (mg/l)	SO <sub>4</sub> (mg/l)
MUSLUK SUYU	79.25	22.77	8.12	1.59	-	<0.01	<0.01	420.90	7.26	23.54
A ATIKSUYU	47.25	80.6	232.8	81.9	14.17	<0.01	<0.01	122.00	404.80	227.41
B ATIKSUYU	51.86	67.38	215.6	27.08	12.89	<0.01	<0.01	518.50	269.12	70.56
C ATIKSUYU	44.52	24.34	92.26	27.2	8.48	<0.01	<0.01	530.70	68.36	54.69
D ATIKSUYU	35.7	32.99	12.03	3.57	2.65	<0.01	<0.01	292.80	8.36	13.76

Çalışmada iki farklı kil kullanılmıştır. Kullanılan yüksek plastisiteli kil Muğla Fethiye İlçesinden (Kalay, 2010), düşük plastisiteli kil ise Isparta Gönen İlçesinden alınmıştır (Yalvaç, 2011). ASTM D1140 ve ASTM D422'ye uygun olarak elek ve hidrometre analizleri, ASTM D4318'ye uygun olarak kıvam limitleri deneyleri yapılmıştır. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre Sınıflandırma deney sonuçları Tablo 3'de verilmiştir.

**Tablo 3.** Sınıflandırma deney sonuçları (Results of classification tests)

ÇAKIL (%)	KUM (%)	SİLT (%)	KİL (%)	WL (%)	WP (%)	PI (%)	ZEMİN CİNSİ
0	2	38	60	108	38	70	CH
15	34	24	27	38	36	2	CL

Kil numunelerin X-Ray Analizleri ve Kimyasal Analizleri Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Laboratuvarlarında yapılmıştır. Tablo 4'de zemin numunelerinin kimyasal analiz sonuçları görülmektedir.

**Tablo 4.** Zemin numunelerinin kimyasal analiz sonuçları (Results of chemical analyses)

NUMUNE	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
CH	< 0.1	17.4	4.3	47.1	< 0.1	0.3	2.8	0.2	0.1	16.6
CL	0.7	4.2	10.5	41.7	0.2	2.2	16.3	0.6	0.2	6.3

X-Ray analizi deneyleri ile hakim kil mineralleri belirlenmiştir. Muğla numunesinde (CH) çokluk sırasına göre; Simektit, Serpantin, Kuvars, Kalsit, Amorf Silika minerallerinin bulunduğu, çok az olarak da Amfibol, Feldispat ve Klorit grubu minerallerin bulunduğu; Isparta numunesinde (CL) çokluk sırasına göre, Kalsit, Klorit Grubu Kil Minerali, İllit, Feldispat, Kuvars, Dolomit minerali, az miktarda amorf malzeme ve çok az karışık tabakalı kil minerali bulunduğu belirlenmiştir.

Yüksek ve düşük plastisiteli kil numuneler üzerinde farklı endüstriyel atıksular kullanılarak ASTM D698'ya uygun olarak standart kompaksiyon deneyleri ve sıkıştırılmış numuneler üzerinde ödometre deney tekniği kullanılarak ASTM D4546 şartlarında sabit hacimli şişme deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları dördüncü bölümde değerlendirilmiştir.

#### 4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Bu çalışmada yüksek plastisiteli ve düşük plastisiteli olan iki farklı kil zemine Isparta ve civarındaki farklı endüstriyel atıksuların etkisi araştırılmıştır. Kıvam limitleri, standart kompaksiyon ve sabit hacimli şişme deney sonuçları bu atıksularla ve musluk suyu kullanılarak yapılan deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Atıksular kullanılarak yapılan deneylerde atıksuyun deneyde kullanılacağı gün tesislerden alınmasına ve uzun süre bekletilmemesine dikkat edilmiştir. Sabit hacimli şişme deneyleri yapılırken No 40 elek altına geçen numuneler standart kompaksiyon deney şartlarında sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Bu deneylerde numune hazırlama aşamasında karışım suyu olarak her bir su ayrı ayrı kullanılmış ve ödometre hücresi de bu su ile doldurulmuştur. Yüksek plastisiteli kil numune ve farklı atıksular kullanılarak yapılan kıvam limitleri, standart kompaksiyon ve sabit hacimli şişme deney sonuçları Tablo 5' de görülmektedir.

**Tablo 5.** Yüksek plastisiteli kil numunesine ait olan deney sonuçları (Experiments results of high plasticity sample) (Yalvaç, 2011)

SULAR	WL (%)	WP (%)	PI (%)	$\gamma_{kmax}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	W <sub>opt.</sub> (%)	P <sub>s</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )
MUSLUK SUYU	108	38	70	1.16	38	0.90
A ATIKSUYU	27	8	19	1.39	24	0.04
B ATIKSUYU	31	6	25	1.44	22	0.50
C ATIKSUYU	33	3	20	1.40	25	0.40
D ATIKSUYU	35	3	32	1.43	22	0.60

Tabloda; WL : Likit Limit, WP : Plastik Limit, PI : Plastisite İndisi,  $\gamma_{kmax}$  : Maksimum kuru birim hacim ağırlık, W<sub>opt</sub> : Optimum su muhtevasını, P<sub>s</sub> ise sabit hacimli şişme basıncını göstermektedir.

Tablo 5 'den yararlanılarak elde edilen sonuçlara göre atıksuların yüksek plastisiteli kilin likit limitini, plastik limitini, plastisite indisini, optimum su muhtevasını ve şişme basıncını azalttığı, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise arttırdığı belirlenmiştir. Yüksek plastisiteli kilin kıvam limitleri ve şişme basıncı üzerinde en etkili olan atıksuyun A ile gösterilen mermer fabrikası atıksuyu olduğu görülmüştür. Maksimum kuru birim hacim ağırlığı en fazla arttıran, optimum su muhtevasını en fazla azaltan atıksu ise B ile gösterilen Organize Sanayi Atıksuyu olmuştur. Organize Sanayi atıksuyunda fazla bulunan Ca ve HCO<sub>3</sub> iyonlarının kuru birim hacim ağırlığı arttırmada ve optimum su muhtevasının azaltılmasında etkili olduğu düşünülürken; Mermer atıksuyunun içerisinde çok fazla bulunan Mg, Na, K, Si, Cl ve SO<sub>4</sub> iyonlarının kıvam özelliklerini ve şişme basıncını azalttığı düşünülmektedir.

Düşük plastisiteli kil numune ve farklı atıksular kullanılarak yapılan Atterberg limitleri, standart proktor ve sabit hacimli şişme deney sonuçları Tablo 6'da görülmektedir.

**Tablo 6.** Düşük plastisiteli kil numunesine ait olan deney sonuçları  
(Experiments results of low plasticity sample) (Yalvaç, 2011)

SULAR	WL (%)	WP (%)	PI (%)	$\gamma_{kmax}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	W <sub>opt</sub> (%)	Ps (kg/cm <sup>2</sup> )
MUSLUK SUYU	38	2	36	1.88	11	0.35
A ATIKSUYU	18	3	15	1.76	12	0.01
B ATIKSUYU	12	2	10	2.05	7	0.02
C ATIKSUYU	14	3	11	2.05	8	0.02
D ATIKSUYU	18	3	15	1.97	8	0.03

Tablo 6 'dan yararlanılarak elde edilen sonuçlara göre atıksuların düşük plastisiteli kilin likit limitini, plastik limitini, plastisite indisini, optimum su muhtevasını ve şişme basıncını azalttığı, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise arttırdığı belirlenmiştir. Düşük plastisiteli kilin kıvam limitleri deneylerinde en etkili atıksu B ile gösterilen Organize Sanayi atıksuyu olurken, şişme basıncı üzerinde en etkili olan atıksuyun A ile gösterilen mermer fabrikası atıksuyu olduğu görülmüştür.

Buna göre her iki kil zeminde de likit limit, plastik limit ve plastisite indisinin musluk suyu ile yapılan deney sonuçları ile karşılaştırıldığında atıksular kullanıldığında kıvam limitlerinin azaldığı görülmüştür. Atıksular kendi içinde değerlendirildiğinde yüksek plastisiteli kil için likit limit, plastik limit ve plastisite indisini en fazla azaltan mermer fabrikası atıksuyu (A) , düşük plastisiteli kil için ise organize sanayi atıksuyu (B) olmuştur. Sistani vd. (2023), şehir atıksularıyla yaptıkları çalışmada kilin likit limitinin %30.4'den 35.2'ye yükseldiğini, plastik limitinin 15.6' dan 27.4' e yükseldiğini ve plastisite indisinin %14.8' den 7.8 'e düştüğünü göstermişlerdir. Likit ve plastik limit deneyleri İnce daneli zeminlerin mühendislik davranışları hakkında bilgi veren çok önemli geoteknik deneylerdendir. Likit limit çift tabaka suyu olarak tutulan suyun kalitesinin bir göstergesidir. Likit limitteki bir değişiklik çift tabaka kalınlığındaki bir değişiklik ile ilgilidir (Sridharan vd., 2002). Izdebska-Mucha and Trzcinski (2021), sıvı petrol yakıtları tarafından uzun süreli kirlenmeye maruz kalan killi zeminlerin daha düşük su muhtevası, plastisite indisi, pH ve zeta potansiyeli ve daha yüksek kütle yoğunluğu ile karakterize edildiğini göstermişlerdir.

Kompaksiyon parametreleri açısından değerlendirildiğinde atıksuların her iki kil zemin için de kuru birim hacim ağırlığı arttırdığı, optimum su muhtevasını azalttığı belirlenmiştir. Organize sanayi atıksuyu her iki zeminde de maksimum kuru birim hacim ağırlığı en fazla arttıran, optimum su muhtevasını en fazla azaltan atıksu olmuştur. Organize sanayi atıksuyunda fazla bulunan Ca ve HCO<sub>3</sub> iyonlarının kuru birim hacim ağırlığı arttırmada ve optimum su muhtevasının azaltılmasında etkili olduğu düşünülmektedir. Artan NaCl konsantrasyonunun kilin maksimum kuru birim hacim ağırlığını arttırdığını, optimum su muhtevasını azalttığını belirtmişlerdir. Kil partiküllerini çevreleyen çift tabaka suyunun buna neden olduğunu, çift tabaka kalınlığının azalmasının maksimum kuru birim hacim ağırlığı arttırdığı, optimum su muhtevasını azalttığı açıklanmıştır (Nayak vd., 2010). Sistani vd. (2023), şehir atıksularıyla yaptıkları çalışmada kilin maksimum kuru birim hacim ağırlığının 17.3kN/m<sup>3</sup>'den 15.6kN/m<sup>3</sup>'e düştüğünü, optimum su muhtevasının %18.7'den %24.1'e yükseldiğini göstermişlerdir.

Atıksularla yapılan şişme basıncı deney sonuçları değerlendirildiğinde atıksuların şişme basıncını azalttığı görülmüştür. Her iki zemin türü için de şişme basıncındaki en fazla azalma mermer fabrikası atıksuyunun kullanıldığı deneylerde elde edilmiştir. Pek çok kimyasalın kilin yayımlı çift tabakasını azaltma eğiliminde olduğu, bunun itki kuvvetlerindeki bir azalmaya ve büzülme neden olacağı, böylece kil partiküllerinin flokülasyona teşvik edileceği belirtilmiştir ( Bowders ve Daniel, 1987; Shi vd., 2015; Massat vd., 2016). Kimyasal

konsantrasyonunun artmasının yayımlı çift tabakayı küçülttüğü, bunun sonucunda kil partiküllerinin floküle olduğu ve şişmenin azaldığı belirtilmiştir ( Alawaji, 1999; Kolstad vd., 2004; Lee vd., 2005; Asaad vd., 2021).

## 5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada dört farklı endüstriyel atıksu ( mermer fabrikası, Organize Sanayi Arıtma Tesisi çıkış suyu, Isparta Atıksu Arıtma tesisi çıkış suyu ve Kovada Kanalı suyu) ve musluk suyunun düşük ve yüksek plastisiteli killerin kıvam limitine, kompaksiyon özelliklerine ve kompaksiyon şartlarında sıkıştırılarak hazırlanmış numuneler üzerinde yapılan sabit hacimli şişme basıncına olan etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda kıvam limitleri, standart kompaksiyon ve sabit hacimli şişme deneyleri yapılmıştır. Çalışmadan şu sonuçlar elde edilmiştir:

1. Yüksek plastisiteli kilin kıvam limitlerinin ve sabit hacimli şişme basıncının azaltılmasında mermer suyunun diğerlerine göre daha etkili olduğu görülmüştür.
2. Düşük plastisiteli kilin kıvam limitlerinin azaltılmasında Organize Sanayi Atıksuyunun diğerlerine göre daha etkili olduğu görülmüştür. Düşük plastisiteli kilin sabit hacimli şişme basıncının azaltılmasında ise mermer suyunun diğer atıksulardan daha etkili olduğu görülmüştür.
3. Her iki kil zeminde de yapılan kompaksiyon deneylerine göre en yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlık ve en düşük optimum su muhtevası Organize Sanayi atıksuyu kullanılarak elde edilmiştir.
4. Atıksulardaki K, Na, Mg ve Si katyon miktarları arttıkça plastisite indisindeki ve şişme basıncındaki azalmanın arttığı görülmüştür. Cl, SO<sub>4</sub> anyon miktarlarının artması ve HCO<sub>3</sub> katyonunun azalması ve iletkenlik değerinin artması plastisite indisini ve şişme basıncını azaltmaktadır.
5. Yapılan deneylerde kullanılan atıksuların Kimyasal Oksijen İhtiyaçları (KOİ) ile kıvam limitleri, standart proktor ve sabit hacimli şişme deney sonuçları karşılaştırıldığında KOİ değeri yükseldiğinde kilin özelliklerinin daha fazla etkilendiği görülmüştür. KOİ değeri yükseldikçe kıvam limitlerinin, optimum su muhtevasının ve şişme basıncının azaldığı, maksimum kuru birim hacim ağırlığın arttığı görülmüştür.
6. Atıksuların kimyasal Oksijen ihtiyaçları, anyon ve katyon değerleri, kimyasal yapıları alındığı güne göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışma kirlenmiş suların zeminin mühendislik özelliklerinden bazılarının değişimini incelemek için sınırlı sayıda numune üzerinde yapılmıştır. Sonuçların daha fazla numune üzerinde yapılarak teyit edilmesi ileriki çalışmalarda düşünülmektedir.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

## Kaynaklar (References)

- Abdallh, A.H.M., 2018. Tuzlu-Sodyumlu Toprak İslahında Stabilize Arıtma Çamuru ve Arıtılmış Atık Suların Kullanım Etkinliğinin Belirlenmesi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 72 sayfa, Erzurum.
- Akyıldız, M.H., 2011. Katı Atık Düzenli Depolama Alanlarında Taban Geçirimsizliğine Etki Eden Parametrelerin Araştırılması, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora tezi, 180 sayfa, Sakarya.
- Alawaji, H.A., 1999. Swell and Compressibility Characteristics of Sand - Bentonite Mixtures Inundated with Liquids, Appl. Clay Sci. 15, 411-430.
- Alsanad, M.A., 2023. The environmental assessment of soil chemical properties irrigated with treated wastewater under arid ecosystem of Al-Ahsa, Saudi Arabia, Arab Gulf Journal of Scientific Research, 25 July 2023.
- Asaad, A., Hubert, F., Ferrage, F., Dabat, T., Paineau, E., Porion, P., Savoye, S., Gregoire, B., Dazas, B., Delville, A., Tertre, E., 2021. Role of interlayer porosity and particle organization in the diffusion of water in swelling clays, Applied Clay Science, Volume 207, 15 June 2021, 106089.
- ASTM D1140, 2017. Standard Test Methods for Determining the Amount of Material Finer than 75-µm (No. 200) Sieve in Soils by Washing, West Conshohocken, PA, A.B.D.
- ASTM D422, Standard Test Method for Particle- Size Analysis of Soils, West Conshohocken, PA, A.B.D., 2014.
- ASTM D4318, 2010. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D698, 2007. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D4546, Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils, West Conshohocken, PA, A.B.D.
- Andrade Lima, L.R.P., Bernandez, L.A., Santos, M.G., Souza, R.C., 2018. Remediation of Clay Soils Contaminated with Potentially Toxic Elements: The Santo Amaro Lead Smelter, Brazil, Case, Soil and Sediment Contamination: An International Journal Volume 27, Issue 7.



- APHA, AWWA, WEF, 1999. Standart methods For the Examination of Water and Waste Water, 20th Ed. (Clesceri, L.S., Greenberg, A.E., Eaton, A.D. Ed.), Washington DC.
- Arasan, S., 2010. Effect of Chemicals on Geotechnical Properties of Clay Liners: A Review, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2(8), 765-775.
- Arasan, S., Yılmaz, G., Akbulut, R.K., Yetimoglu, T., 2007. Engineering Properties of Compacted Clay Liners Contaminated by Salt Solution, Adana, Turkey, 415-425.
- Arasan, S., Yetimoglu, T., 2008. Effect of Inorganic Salt Solutions on the Consistency Limits, *Turk. J. Eng. Environ. Sci.*, 32, 107-115.
- Arasan, S., Yetimoglu, T., 2006. Effect of Leachate Components on the Consistency Limits of Clay Liners, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi*, 439-445.
- Baykuş, N., Karpuzcu, M., 2021. İnce Taneli Zeminlerin Kimyasal ve Fiziksel Özelliklerine Atık Suyun Etkilerini, *European Journal of Science and Technology No. 31 (Supp. 1)*, pp. 771-775.
- Bowders, J.J., Daniel, D.E., 1987. Hydraulic Conductivity of Compacted Clay to ilute Organic Chemicals, *ASCE J. Geotech. Eng.*, 113 (12), 1432-1448.
- Chen, W.C., Huang, W.H., 2013. Effect of Groundwater Chemistry on the Swelling Behavior of a Ca- Bentonite for Deep Geological Repository ,*Physics and Chemistry of the Earth*, 65, 42-49.
- Çay, Ş., Kanber, R., 2021. Atık Su ile Sulanan Mısır Bitkisinde Makro ve Mikro Element ve Ağır Metal Birikimi, *Toprak Su Dergisi, Cilt Özel Sayı*, 67 – 75.
- Estabragh, A.R., A mini, M., Javadi, A.A., Noguera, C.L., 2022. Remediation of a clay soil contaminated with phenanthrene by using mixture of bentonite and cement, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 29 November 2022.
- Dixon, D. A., 2000. Porewater Salinity and the Development of Swelling Pressure in Bentonite Based Buffer and Backfill Materials, *POSIVA 2000-04*, Posiva Oy, Helsinki, Finland.
- Dor, M, Levi-Kalisman, Y, Day-Stirrat, R, Mishael, Y, Emmanuel, S., 2020. Assembly of Clay Mineral Platelets, Tactoids, and Aggregates: Effect of Mineral Structure and Solution Salinity. *J Colloid Interface Sci.*, 566.
- Erken, A., Alp, K., Er, N., Yıldırım, H., Eldem, N.Ö., Kaya, Z., Tasköy, A., 2006. İnce Daneli Zeminlerin Davranışları Üzerinde Çöp Suyunun Etkisi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi*.
- Ghiyas, S.M.R., Bagheripour, M.H., 2020. Stabilization of Oily Contaminated Clay Soils Using New Materials:Micro and Macro Structural Investigation, *Geomechanics and Engineering*, Volume 20, Number 3, pages 207-220.
- Herbert, H.J., Moog, H. C., 2000. Modeling of Saturation and Swelling Effects in Clays Under Different Saline Conditions, In *Eurosafe*, Cologne, Germany.
- Izdebska-Mucha, D., Trzcinski, J., 2021. Clay Soil Behaviour Due to Long-Term Contamination by Liquid Petroleum Fuels: Microstructure and Geotechnical Properties, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Volume 80, pages 3193–3206.
- Li, C., Zhou, K., Qin, W., Tian, C., Qi, M., Yan, X., 2019. A Review on Heavy Metals Contamination in Soil: Effects, Sources, and Remediation Techniques, *Soil and Sediment Contamination: An International Journal* Volume 28, Issue 4.
- Jia, J.C., Yang, Q., 2010. Influence of Pore Water Chemistry on the Swelling Pressure of Compacted Bentonite-Clays, *EJGE*, 15, Bund. C, 321-326.
- Jiang N, Wang C, Wu Q, Li S., 2020. Influence of Structure and Liquid Limit on The Secondary Compressibility of Soft Soils. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8:627.
- Kalay, E., 2010. Sıkıştırılmış Yüksek Plastisiteli Kil Zemin Stabilizasyonunda Pomza, Mermer Tozu ve Kirecin Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 54s.,Isparta.
- Karabash, Z., Al-Obaydi, M.A., Awad, M.A., Al-Khashab, M.N., 2023. Geotechnical Properties of Clay Soil Contaminated with Different Types of Oil, *Geotech Geol Eng.*, 41:2677–2689.
- Kolstad, D.C., Benson, C.H., Edil, T.B., Jo, H.Y., 2004. Hydraulic Conductivity of a Dense Prehydrated GCL Permeated with Aggressive Inorganic Solutions, *Geosynth. Int.*, 11, 3, 233-241.
- Lee, J.M., Shackelford, C.D., Benson, C.H., Jo, H.Y., Edil, T.B., 2005. Correlating Index Properties and Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 131 (11), 1319-1329.
- Maaitah, O., Tarawneh, S.A., 2003. Effect of Treated Waste Water on the Behavior of Unsaturated Soil, *Pakistan Journal of Applied Sciences* 3, 5, 360-3693.
- Massat, L., Cuisinier, O., Bihannic, I., Claret, F., Pelletier, M., Masroui, F., Gaboreau, S., 2016. Swelling Pressure Development and Inter-Aggregate Porosity Evolution Upon Hydration of a Compacted Swelling Clay, *Applied Clay Science*, Volumes 124–125, May 2016, Pages 197-210.
- Mosavat, N., Nalbantoglu, Z., 2013. The Impact of Hazardous Waste Leachate on Performance of Clay Liners, *Waste Management & Research*, 31(2), 194–202.
- Nayak, S., Sunil, B.M., Shrihari, S., Sivapullaiah, P.V., 2010. Interactions Between Soils and Laboratory Simulated Electrolyte Solution, *Geotech. Geol. Eng.*, 28 (6), 899-906.
- Urena, C., Azanon, J.M., Corpas, F., Nieto, F., Leon, C., Perez, L., 2013. Magnesium Hydroxide, Seawater and Olive Mill Wastewater to Reduce Swelling Potential and Plasticity of Bentonite Soil, *Construction and Building Materials*, 45, 289-297.
- Park, J., Vipulanandan, C., Kim, J.W., Oh, M.H., 2006. Effects of Surfactants and Electrolyte Solutions on the Properties of Soil, *Environ. Geol.*, 49, 977-989.
- Quainoo, A.K., Bavoh, C.B., Duartey, K.O., Alhassan, D., 2022. Clay Swelling Inhibition Mechanism Based on Inhibitor-water Interaction; A COSMO-RS Molecular Simulation Approach, *Upstream Oil and Gas Technology*, Vol.9, 100080.
- Rao, A.V.N., Chittaranjan, M., 2012. Effect of Certain Industrial Effluents on Plasticity and Swelling Characteristics of an Expansive Soil- a comparative Study, *Int. Journal of Engineering Science and Technology*, 10, 4390-4397.
- Savage, D., 2005. The Effects of High Salinity Groundwater on the Performance of Clay Barriers, *SKI Report*, 54.
- Sdiri, W., AlSalem, H.S., Al-Goul, S., Binkadem, M.S., Mansour, H.B., 2023. Assessing the Effects of Treated Wastewater Irrigation on Soil Physico-Chemical Properties, *Sustainability*, 15(7), 5793.

- Shirazi, S.M., Wiwat, S., Kazama, H., Kuwano, J., Shaaban, M.G., 2011. Salinity Effect on Swelling Characteristics of Compacted Bentonite, *Environment Protection Engineering*, 37, 2, 65-74.
- Shoib, M., Cruz, N., Bobicki, E.R., 2022. Effect of pH-Modifiers on the Rheological Behaviour of Clay Slurries: Difference Between a Swelling and Non-Swelling Clay, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol.643, 128699.
- Sistani, S.V.M., Negahdar, H., Bamoharram, F.F., Shakeri, M.R., 2023. Geotechnical properties and microstructure of clay contaminated with urban wastewater and remediated with  $\alpha$ -Aluminum oxide/ $\alpha$ -Iron oxide nanohybrid, *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, Volume 32, Issue 7.
- Sridharan, A., El-Shafei, A., Miura, N., 2002. Mechanisms Controlling The Undrained Strength Behavior of Remolded Arieke Marine Clays, *Georeso. Geotech.*, 20, 21-50.
- Suzuki, S., Prayongphan, S., Ichikawa, Y., Chae, B.G., 2005. In Situ Observations of The Swelling of Bentonite Aggregates in NaCl Solution, *Appl Clay Sci* 29, 89-98.
- Taşköy, A., 2006. Düşük Plastisiteli Zeminlerin Davranışları Üzerinde Çöp Suyunun Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 204 sayfa, İstanbul.
- Tarekegn, M.M., Salilih, F.Z., Ishtu, A.I., Yıldız, F., 2020. Microbes used as a tool for bioremediation of heavy metal from the environment, *Cogent Food & Agriculture*, Volume 6, Issue 1.
- Wang, Q., Cui, Y.J., Tangi A.M., Delage, P., Gatmiri, B., Ye, W.M., 2014. Long-Term Effect of Water Chemistry on the Swelling Pressure of a Bentonite- Based Material, *Applied Clay Science*, 87, 157-162.
- Yalvaç, E., 2011. Kilin Mühendislik Özelliklerine Atıksuların Etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi - Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 54 sayfa, Isparta.
- Yılmaz, A., 2016. Bor İçeren Atık Suların Portlant Çimentosu Harcı Üretiminde Kullanılması, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt 18, Sayı 54, 481-490.
- Yılmaz, G., Yetimoğlu, T., Arasan, S., 2008. Hydraulic Conductivity of Compacted Clay Liners Permeated with Inorganic Salt Solutions, *Waste Manage. Res.*, 26, 464-473.
- Yin, C., Zahao, J., Liu, X., Yu, Z., Liu, H., 2022. Effect of Coal Water Slurry Gasification Slag on Soil Water Physical Characteristics and Properties in Saline-Alkali Soil Improvement, *Advanced Sensor Technologies in Agricultural, Environmental, and Ecological Engineering 2021*, *Journal of Sensors*.
- Yurtcan, U.E., 2023. Kil Zeminlerin Mekanik Davranışına Tuz Çözeltileri Etkisi, *MAUN Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 4(1), 11-22.
- Zhang, H.Y., Cui, S.L., Zhang, M., Jia, L.Y., 2012. Swelling Behaviors of GMZ Bentonite- Sand Mixtures Inundated in NaCl-Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Solutions, *Nuclear Engineering and Design*, 242, 115-123.
- Zhu, C.M., Yewei, M., Chen, Y.G., Chen, B., Cui, Y.J., 2013. Influence of Salt Solutions on The Swelling Pressure and Hydraulic Conductivity of Compacted Gmz01 Bentonite, *Engineering Geology*, 166, 74-80.
- Zalacain, D., Bienes, R., Santre-Merlin, A., Martinez-Perez, S., Garcia-Diaz, A., 2019. Influence of reclaimed water irrigation in soil physical properties of urban parks: A case study in Madrid (Spain), *Catena*, Volume 180, Pages 333-340.