



Kum Bentonit Karışımında Sızıntı Suyunun Hidrolik İletkenliğe Etkisi

The Effect of Leachate on the Hydraulic Conductivity of a Sand Bentonite Mixture

Seda Durukan 

Manisa Celal Bayar Üniversitesi Manisa Teknik Bilimler MYO, Manisa, TÜRKİYE
Sorumlu Yazar / Corresponding Author*: seda.durukan@cbu.edu.tr

Öz

Bu çalışmada düzenli atık depolama sahaları altında geçirimsiz tabaka olarak da kullanılan kum-bentonit karışımlarının sızıntı suyu karşısındaki geçirimsizlik davranışı incelenmiştir. Bu amaçla kum-bentonit karışımı içerisinde sızıntı suyunun geçirildiği esnek duvarlı hidrolik iletkenlik deneyine tabi tutulmuştur. Literatürde genel olarak musluk suyu ya da yapay kirleticiler ile gerçekleştirilen hidrolik iletkenlik deneyleri, bu çalışmada orijinal sızıntı suyu ile gerçekleştirilmiştir. Sızıntı suyu olarak da Ege Bölgesinden seçilen bir katı atık depolama sahasından elde edilen sızıntı suları kullanılmıştır. Kum-bentonit karışımının oranı kuru ağırlıkça %10 bentonit içerecek şekilde hazırlanmıştır. Deney esnasında sızıntı suyunun giriş ve çıkış sıvılarının bazı kimyasal analizleri de gerçekleştirilmiştir. Ölçülen hidrolik iletkenlik değerlerinin sınır koşullara yakın olmak kaydı ile, kriterleri sağladığı belirlenmiştir. Bununla beraber, musluk suyu sonuçlarına göre artış görüldüğü de dikkati çekmiştir. Ortam pH'ı tüm deneylerde bazik olarak ölçülmüştür. Sızıntı suyuna ait giriş sıvısının elektriksel iletkenliğinin, tüm örneklerin çıkış sıvılarının elektriksel iletkenliğine oranı 1'in altında kalmıştır. Bu durum deneyin sonlandırıldığı anda katyon değişimlerinin sonlanmadığını işaret etmektedir. Son olarak da giriş ve çıkış sıvılarından bazı alkali ve toprak alkali metali iyonlarındaki değişimler ölçülmüş, karışımdaki kilin sızıntı suyu maruziyeti altında mineral yapısındaki değişimler belirlenmiş ve hidrolik iletkenliğe etkisi de tartışılarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Geçirimsiz Tabaka, Kum Kil Karışımları, Sızıntı Suyu, Hidrolik İletkenlik

Abstract

The permeability behavior of sand-bentonite mixtures which are used as liner, was investigated by using original leachate. In this regard, the flexible wall hydraulic conductivity tests were performed. In literature, the conventional test procedures generally comprise the permeability values of the liners by using tap water, this study suggested determining the hydraulic conductivities under the effect of leachate. Thus, leachate samples were taken from a municipal solid waste site located in the Aegean region. The selected proportion is 10% bentonite as the dry weight for a sand-bentonite mixture. Some chemical analyses were also done for the inlet and outlet leachate samples. It is found that the mixture ensures the hydraulic conductivity criteria for landfill liners while it approaches the critical value. Also, it should be noted that the hydraulic conductivity with leachate was found to be more than that of with tap water. The pH of the environment for each test was found to be basic. The electrical conductivity values for each test were found to be under 1. This situation implies that the cation exchange process was not completed. Finally, some alkaline and alkaline earth metals were measured in both inlet and outlet fluids, changes in the mineral structure of the clay in the mixture under leachate exposure were determined and their effect on the hydraulic conductivity was discussed.

Keywords: Landfill Liner, Sand-Bentonite Mixtures, Leachate, Hydraulic Conductivity

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Many studies have been conducted on impervious layer or barrier applications and filtration studies in landfills [1-9]. According to the data obtained from the studies to date, the desired properties of liners are low hydraulic conductivity, high adsorption capacity, resistance to changes in temperature and water content, suitable mechanical properties to ensure continuity during and after the construction phase, low cost and abundant availability. Clays are the first liner material that comes to mind with their low hydraulic conductivity and high adsorption capacity. However, studies have shown that clays are highly affected by temperature and water content changes;

cracks are formed in the impermeable material and therefore engineering parameters are far from the desired level. Since clays do not give the desired results under the influence of temperature and water content changes, the idea of mixing them with sands has been proposed [10]. As a result, bentonite, which has the lowest hydraulic conductivity among the clay types, was mixed with sand. The sand-bentonite mixture (SBM) gave the desired result and no cracks were observed after temperature and water content changes. Hydraulic conductivity studies of liner materials in landfills are usually carried out using tap water. Values obtained using tap water can only provide a baseline, a reference value and cannot explain the behavior under the influence of leachate in the field. When the adsorption studies

carried out to determine the behavior of liners against the pollutants are examined, it is seen that pollutants are generally used individually or in controlled synthetic mixtures in experiments conducted in laboratories [11-13]. This situation in laboratory research is far from reflecting the real conditions in the field. On the other hand, it is very difficult to determine the adsorption and retention behavior of the liner exposed to such a complex chemical mixture. In most of the studies conducted with original leachate, differences in the chemical diversity and characteristics of leachate have been presented and have been reported to have a strong influence on soil chemistry and properties [14, 15]. In this study, a SBM sample was tested in the presence of selected leachate and the hydraulic conductivity value was determined under the influence of contaminants in the original leachate mixture.

Materials and Methods

The mixture was obtained by mixing the sand material sieved under No.10 sieve with powdered bentonite passed from No.200 sieve. Some basic geotechnical properties of the soils used in this study are presented in Table 1 below. Leachate from Harmandalı (H) Solid Waste Landfill selected from the Aegean region was used as leachate. The leachate from this landfill was chemically analyzed by inductively coupled argon plasma (ICP-OES) and presented in Table 2. After the hydraulic conductivity test with this leachate, which was used as inlet fluid, the effluent fluid were also analyzed and compared with the same method. Hydraulic conductivity test was conducted according to ASTM D5084. In addition, to monitor the changes in the mineralogical structure of the clay in the mixture, XRD analysis of the clay was performed before and after the experiments.

Results and Discussion

During the flexible-wall hydraulic conductivity experiments with SBM-H, outlet fluid was collected and pH and electrical conductivity (EC) were measured both initially and at different times. The pH value of the effluents indicated that the environment was basic. The pH values measured in this study are higher than the most efficient pH values for the adsorption mechanism reported in the literature. The pH values of the effluents of the SBM-H sample were higher than 8 and sometimes even exceeded 9. When the ratio of the outlet EC values to the inlet EC values is analysed, an increase for equilibration after a sudden decrease was seen as expected. A ratio less than 1 indicates that the cation exchange has not yet been completed at the time the experiment was terminated.

According to the average of the last 5 experimental data, the hydraulic conductivity value of the SBM-H sample was measured as $5.10 \cdot 10^{-10}$ m/s (Figure 4). Although the measured value is below the limit value of 10^{-9} m/s, it can be said that it is at the critical stage. Looking at the hydraulic conductivity values determined with tap water presented in Figure 1, it is seen that the values measured for 10% SBM samples vary between $2.10 \cdot 10^{-10}$ m/s and $3.10 \cdot 10^{-12}$ m/s. It was determined that the hydraulic conductivity values measured with leachate found to be more than that for tap water. It was stated that the chemistry of the leachate caused an increase in the hydraulic conductivity. When the effluent of 10% SBM-H sample is compared and evaluated with the initial leachate, it is observed that alkali and alkaline earth metals except Ca decreased until approximately 0.6 pore volumes of flow (Figure 5). Ca ion showed a significant increase up to 0.6 pore

volumes of flow and then tended to decrease rapidly. In other words, the 10% SBM-H sample released the Ca element from the beginning to the middle of the experiment and then this process was reversed. Considering that the hydraulic conductivity value determined with tap water for samples with the same compaction parameters as in this study was in the order of 10^{-12} m/s, it is seen that the hydraulic conductivity value increased almost for three magnitudes for SBM-H. One reason for this may be the replacement of Ca^{+2} with Na^{+} ions. If the hydraulic conductivity graph (Figure 4) of this sample is examined, it can be seen that the hydraulic conductivity value, which tends to decrease until approximately 0.6 pore volumes of flow, increases after 0.6 pore volumes of flow. However, considering the complex chemistry of leachate, this cannot be shown as the only reason. Nevertheless, it has been shown in other studies that hydraulic conductivity increases with increasing ion concentration [27-29]. In addition, when the pH exceeds 9, it suggests that the mineralogical structure of the clay in the mixture may have been affected. Therefore, XRD analyses were performed to determine the state of the clay in the mixture before and after leachate percolation and the results are presented in Figure 6.

The most interesting point in Figure 6 is the decrease in montmorillonite peaks. It was even observed that some peaks disappeared. It can be clearly seen from the XRD graphs that the leachate chemistry has changed the clay mineralogy. Many factors such as mineral arrangement in clays and even surface position affect XRD results [30], but in terms of preliminary findings, it is seen that the structure of montmorillonite mineral exposed to leachate has changed. This also contributes to the explanation of the increase in the hydraulic conductivity value in the leachate-exposed sample. However, it is clear that a detailed study on the subject is also needed.

Conclusion

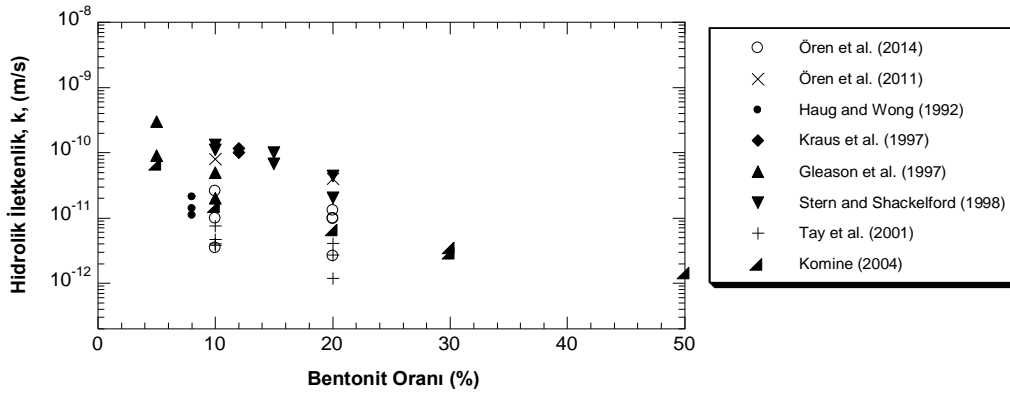
The main findings of the study are summarized below.

- Leachate from a solid waste landfill was investigated and some chemical properties were presented.
- The hydraulic conductivity value for 10% SBM-H was $5.10 \cdot 10^{-10}$ m/s. During this process, such changes in the mineralogical structure of the clay were detected.
- The pH values of the inlet fluids of the leachate are found to be basic. The pH values of the effluents increased and exceeded 9 for such measurements. This pH environment is far from the adsorption environment suitable for a clayey soil. In addition, Na^{+} and Ca^{+2} ions were found to be exchanged.
- The hydraulic conductivity experiments were terminated after reaching one pore volumes of flow, so the results do not include a long-term evaluation.
- No bacterial growth was observed in the samples during the experimental period, and a decrease in hydraulic conductivity values can be expected with bacterial growth in long-term analysis. Long-term hydraulic conductivity values can be investigated in future studies.
- For future studies, it is strongly recommended to investigate under which conditions and how the leachate affect on the mineralogical structure in detail.

1. Giriş

Düzenli atık depolama sahalarında geçirimsiz tabaka ya da bariyer uygulamaları ve filtreleme çalışmaları ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır [1-9]. Günümüze kadar yapılan çalışmalardan elde edilen verilere göre geçirimsiz tabakalarda olması istenen özellikler; düşük hidrolik iletkenlik, yüksek adsorpsiyon kapasitesi, sıcaklık ve su içeriğindeki değişimlere karşı dayanıklılık, inşaat aşamasında ve sonrasında süreklilik sağlayacak uygun mekanik özellikler, ucuz maliyet ve bol miktarlarda bulunabilirliktir. Killer, düşük hidrolik iletkenlikleri ve yüksek adsorpsiyon kapasiteleri ile akla ilk gelen geçirimsiz tabaka malzemesidir. Bununla beraber, yapılan araştırmalar göstermiştir ki; killer sıcaklık ve su içeriği değişimlerinden oldukça fazla etkilenmekte; geçirimsiz malzemede çatlaklar oluşmakta ve dolayısıyla mühendislik parametreleri de istenilen düzeyden uzaklaşmaktadır. Killerin sıcaklık ve su içeriği

değişimleri etkisinde arzu edilen sonucu vermemesi üzerine, kumlarla karıştırılması fikri öne sürülmüştür [10]. Sonuç olarak kil çeşitlerinin arasından en düşük hidrolik iletkenliğe sahip olan bentonit ile kum karıştırılarak kullanılmıştır. Kum-bentonit karışımı (KBK) istenilen sonucu vermiş; ayrıca sıcaklık ve su içeriği değişiminden sonra çatlaklar da gözlenmemiştir. Bu uygulamanın öncülleri olarak Kleppe ve Olson (1985) gösterilmektedir [10]. Düzenli atık depolama sahalarında geçirimsiz tabaka malzemelerinin hidrolik iletkenlik araştırmaları genellikle musluk suyu kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Literatürdeki KBK'lara ait musluk suyu ile yapılmış bazı hidrolik iletkenlik deneylerinin sonuçları Şekil 1'de sunulmuştur. Bu çalışmalar farklı bentonit oranlarında ve yine farklı kompaksiyon su içeriklerinde gerçekleştirilmiştir. Geçirimsiz tabakalar için sağlanması istenilen sınır değer olan 10^{-9} m/s değerinin tüm deney örneklerce sağlandığı görülmektedir.



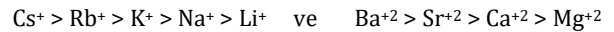
Şekil 1. Kum-bentonit karışımlarının musluk suyu ile elde edilen hidrolik iletkenlik değerleri

Figure 1. Hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures with tap water

Musluk suyu kullanarak elde edilen değerler ancak bir temel referans değer oluşturup sahada kirletici suyu etkisi altındaki davranışı açıklayamazlar. Geçirimsiz tabakaların düzenli atık depolama sahalarında maruz kalacakları kirleticilere karşı davranışlarını tespit etmek üzere gerçekleştirilen adsorpsiyon çalışmaları incelendiğinde ise laboratuvarlarda yapılan deneylerde genelde kirleticilerin tek tek ya da kontrollü sentetik karışımlar halinde kullanıldığı görülmektedir [11-13]. Bradshaw ve Benson (2013) geosentetik killer için gerçekleştirdikleri deneylerde ana inorganik katyon konsantrasyonlarının, gerçek sızıntı suyunu temsil ettiği anda ölçülen hidrolik iletkenlik değerinin kabul edilebilir düzeyde olduğunu belirtmişlerdir [12]. Oysa kirleticiler düzenli atık depolama sahalarında serbest bir karışım halinde bulunmaktadır ve kompleks bir kimyasal düzen içerisindeyler. Laboratuvar araştırmalarındaki bu durum sahadaki gerçek koşulları yansıtmaktan uzaktadır. Bununla beraber, bu kadar karmaşık bir kimyasal karışıma maruz kalan geçirimsiz tabakanın adsorpsiyon ve tutulum davranışını belirlemek de oldukça güçtür. Orijinal sızıntı suyu ile yapılan çalışmaların çoğunda ise sızıntı sularının kimyasal çeşitlilikleri ve karakteristiklerindeki farklılıklar sunulmuş ve zemin kimyasını ve özelliklerini de oldukça etkilediği belirtilmiştir [14, 15]. Kuvvetli asidik ve bazik özellikler ($pH < 3$ ve $pH > 11$) taşıyan sızıntı sularının ise kil minerallerini çözdürdüğü de ortaya konmuştur [16-18]. Bununla beraber, uzun dönem etkisi olarak biyolojik etkenler de dikkati çekmiş ve bakteri oluşumunun hidrolik iletkenliği düşürdüğü belirtilmiştir [19, 20]. Abdellah vd. (2020) çalışmalarında kil minerallerinin sızıntı suyu karşısında değişimini X-ışını kırınım yöntemi (XRD) kullanarak incelemiş ve kilin kimyasal yapısında farklılaşmalar

söz konusu olduğunu belirtmiştir [18]. Buna göre, sızıntı suyuna maruz kalan kilin kristobalit ve montmorillonit oranında bir azalma tespit etmişlerdir. Benzer bir tespit Xiang vd. (2019) tarafından da yapılmış olup yüksek alkali çözeltilerin geçirildiği zeminlerde bentonit miktarında azalma olduğundan bahsedilmiştir [17]. Ek olarak, zeminin çözeltilere maruz kaldığı süre uzadıkça azalmanın da arttığı belirtilmiştir. Sızıntı suyunun geçirimsiz tabakaların hidrolik iletkenliğine olan etkisi üzerine kapsamlı bir araştırma (Özçoban vd. 2022) çalışmaların genel olarak kil tabakaları ve geosentetik killerden oluştuğunu göstermiştir [21].

Bu çalışmada ise KBK örnekleri, seçilen sızıntı suyu varlığında teste tabi tutulmuş ve hidrolik iletkenlik değeri orijinal sızıntı suyu karışımındaki kirleticilerin etkisi altında belirlenmiştir. Oldukça karışık bir kimyasal içeriği olan sızıntı suları zemin örneklerinden geçirildiğinde, davranışı hem tahmin etmek hem de takip etmek oldukça zordur. Bununla beraber, yeraltı suyundaki en önemli katyon değişimlerinin alkali ve toprak alkali elementleri arasında gerçekleştiği bilinmektedir. Bu kapsamda, hidrolik iletkenlik deneyinin öncesinde ve sonrasında giriş ve çıkış sıvılarından örnekler alınmış ve hedeflenen bazı alkali ve toprak alkali metallerindeki değişimler ölçülmüştür. Kumun herhangi bir adsorpsiyon kapasitesinin olmadığı düşünüldüğünde kimyasal reaksiyonların sadece kil zeminde gerçekleşeceği bilinmektedir ve killerdeki alkali ve toprak alkali elementlere karşı adsorpsiyon ilgisi ise aşağıdaki gibidir [22].



Genel anlamda 2 değerlikli iyonların adsorpsiyon ilgisi tek değerlikli iyonlardan büyüktür. Bununla beraber, Na⁺ ve Ca⁺² iyonlarının değişim reaksiyonunun bentonitler (smektit grubu) için şişme kapasitesi ve geçirimsizliği direkt olarak etkilemesi sebebi ile ayrı bir önemi de bulunmaktadır. Na⁺ ve Ca⁺²'nin hidratlaşmış iyon çapları; iki hidratlaşmış Na⁺ bir Ca⁺²'den daha fazla alan gerektirecek şekildedir. Bu nedenle, değişim alanlarında Ca⁺²'nin Na⁺ ile yer değiştirmesi kilin kristal kafes boyutlarında büyümeye neden olmaktadır. Bunun bir sonucu olarak da geçirgenlikte bir azalma meydana gelmektedir. Dolayısı ile zemin örneğindeki Na⁺ ve Ca⁺² adsorpsiyonu ya da değişimi hidrolik iletkenliğinin değişimini açıklamakta oldukça tutarlı sonuçlar vermektedir. Bu çalışma kapsamında da giriş ve çıkış konsantrasyonlarının ölçümü ve karşılaştırması amacı ile Ca⁺², Na⁺, Mg⁺² ve K⁺ iyonları seçilmiştir. Bununla beraber, karışımın içindeki bentonitin sızıntı suyuna maruz kalması ile mineralojik yapısında bir değişim olup olmadığı da XRD araştırmaları ile incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada malzeme olarak doğal zeminler ve bir katı atık depolama sahasından elde edilen sızıntı suları kullanılmıştır. Granüler zeminlerden kum (K), Aydınlar Kum (Turgutlu-Manisa) şirketinden sağlanmıştır. Kil olarak ise montmorillonit minerali ağırlıklı bir bentonit (B) seçilmiş olup Karakaya Bentonit (Ankara) firmasından elde edilmiştir, bu malzemedeki kil oranı hidrometre ile belirlenmiştir. Karışımlar ise No.10 eleğin altında kalacak şekilde elenen kum malzemenin No.200 eleğin altındaki toz bentonit ile karıştırılması ile elde edilmiştir. Hidrolik iletkenlik deneylerine tabi tutulacak zemin karışımlarında kullanılacak olan malzemelerin bazı temel geoteknik özellikleri de belirlenmiş ve aşağıda Tablo 1'de sunulmuştur. Zemin örneklerindeki kum oranı toplam ağırlığın %90'ı olacak şekilde hazırlanmıştır. Diğer bir deyişle %10 KBK dendiğinde toplam kuru ağırlığın %10'unun bentonit ve %90'ının da kum oluşturmaktadır.

Standart Proctor enerjisi ile karışımların sıkışma parametreleri (optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık) belirlenmiş ve seçilen sıkışma parametreleri ile sıkıştırılıp hazırlanan zemin örnekleri hidrolik iletkenlik testine tabi tutulmuş ve direkt yoldan permeabilite değerlerine ulaşılmıştır.

Tablo 1. Zeminlerin bazı geoteknik özellikleri

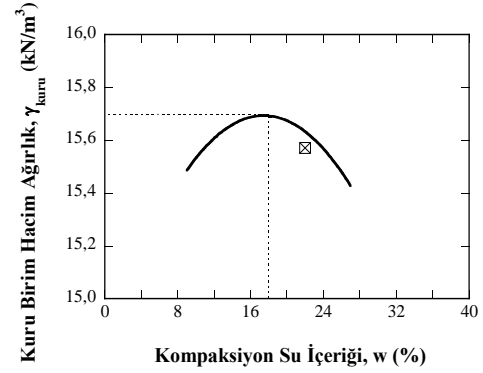
Özellikler	Bentonit	Kum
Mineraloji	Smektit Kristabolit Kuvars	Kuvars
Dane Çapı		
Dağılımı		
Çakıl	%0	%100
Kum	%4	%100
Silt	%21	%0
Kil	%75	%0
Kıvam Limitleri		
Likit limit	%405	
Plastik limit	%57	NP*
Plastisite İndisi	%348	
Özgül Ağırlık	2,71	2,65

*NP: Non-plastik

Hidrolik iletkenlik deneyi ASTM D5084'e göre yürütülmüştür [23]. Hidrolik iletkenlik deneyleri akış boşluk hacminin 1'e ulaşması ve giriş-çıkış sıvılarının oranının en çok ±%25 değerine sahip olması koşulu üzerine sonlandırılmıştır. Deney süreleri 2-3

ay sürmüştür. Standart Proctor kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırılarak hazırlanan örnekler için sıkışma eğrisi ve hidrolik iletkenlik deneyine tabi tutulmak üzere seçilen ikili değer Şekil 2'de sunulmuştur.

Çöp alanları ve atıklar sosyo-ekonomik düzeylere göre çeşitlilik göstermektedirler. Ülkeler ve hatta şehirler arasında oldukça belirgin farklılıklar oluşmaktadır. Bu yüzden her bölgenin atıklarından meydana gelen sızıntı suları da farklılık göstermektedir. Sızıntı sularının karakterizasyonu, bariyer ya da filtre malzemesi seçiminde birincil derecede önem arz etmektedir. Bu çalışmada Ege bölgesinden seçilen Harmandalı (H) Katı Atık Sahalarından elde edilen sızıntı suları incelenmiştir.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan karışımların sıkıştırma parametreleri

Figure 2. Compaction parameters of soil in this study

Harmandalı sızıntı suyu geçirilen zemin örneği de KBK-H olarak isimlendirilmiştir. Bu katı atık depolama sahasından elde edilen sızıntı sularının induktif eşleşmiş argon plazma (ICP-OES) ile kimyasal analizi yapılmıştır. ICP-OES analizlerinde Agilent-5110 tip cihaz kullanılmıştır. Giriş sıvısı olarak kullanılacak olan bu sızıntı suları ile hidrolik iletkenlik deneyi sonrasında aynı yöntemlerle çıkış suları da analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Sızıntı sularının bazı kimyasal analiz sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Sızıntı suları kimyasal analizi

Table 2. Chemical analyses of leachate

İçerik	Miktar
pH	8,60
EC*	32600 µS/cm
KOİ*	5600 mg/L
BOİ*	4000 mg/L
TOM*	% 0,43
Sertlik (CaCO ₃)	1740 mg/L
NH ₃ -N	2254 mg/L
Al	0,19 mg/L
As	0,37 mg/L
Fe	12,7 mg/L
Mn	0,067 mg/L
Ca	24,8 mg/L
Mg	403 mg/L
Na	2832 mg/L
K	1193 mg/L
Ni	0,71 mg/L
Zn	0,17 mg/L
Pb, Cu, Hg	<0,01 mg/L

*EC elektriksel iletkenlik, KOİ kimyasal oksijen ihtiyacı, BOİ biyolojik oksijen ihtiyacı ve TOM ise total organik madde anlamına gelmektedir.

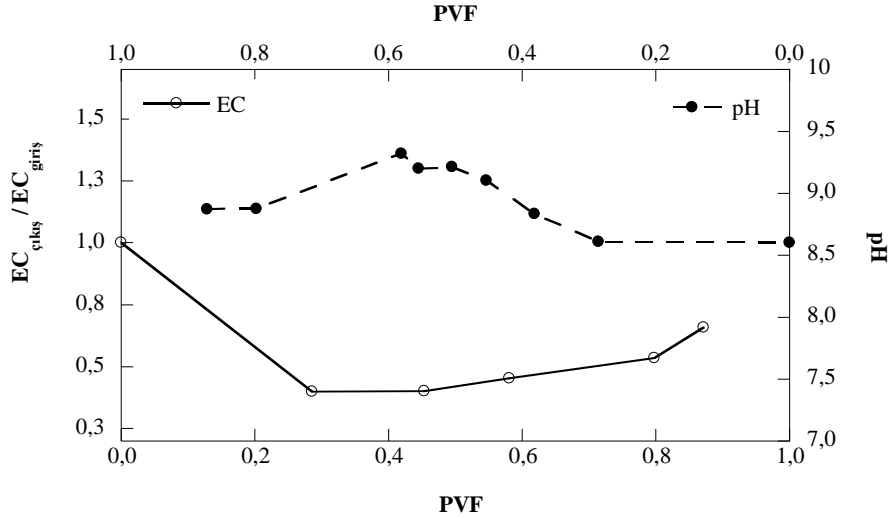
Karışımdaki kilin kristal yapısındaki değişimlerin izlenmesi amacı ile de deneylerden önce ve sonra kile ait XRD incelemesi gerçekleştirilmiştir. Öncesinde kullanılan toz bentonit hazır olarak mevcutken deney sonrası için hidrolik iletkenlik deneyinde kullanılan numune parçalanarak No.200 elekten geçirilmiş ince daneli malzeme kullanılmıştır. XRD dedektörü olarak PIXcel 1D sistemi ve anod malzemesi olarak bakır (Cu) X-ray kaynağı bulunurken, değerlendirmelerde de PANalytical X'Pert HighScore kullanılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

KBK-H ile gerçekleştirilen esnek duvarlı hidrolik iletkenlik deneyleri sırasında zemin örneklerinden geçirilen sızıntı suları toplanmış ve hem başlangıçta hem de farklı zamanlarda pH ve elektriksel iletkenlikleri (EC) ölçülmüştür. İlgili değerler akış boşluk hacmine (pore volumes of flow - PVF) göre sunulmuştur. Çıkış sularının pH değerlerindeki değişim başlangıç durumundan itibaren sırası ile ve EC değerlerindeki değişim ise çıkış sularının EC değerinin başlangıç EC değerine oranı olarak Şekil 3'te sunulmuştur. Zemin örneklerinden elde edilen çıkış sularının pH'ları değerlendirildiğinde, zemin örneğinde sızıntı suları için önce bir artış ardından azalma görülmektedir. Çıkış

sularının pH değeri ortamın bazik olduğuna işaret etmektedir. Literatür çalışmalarında bentonit için Cr elementi hariç ağır metaller için en iyi adsorpsiyon ortam pH değeri genelde 6 olarak gösterilmekte ve 8'den yüksek pH seviyelerinde metal adsorpsiyonunun azaldığı belirtilmektedir [24]. Cr elementinin adsorpsiyonu için ise en elverişli ortamın daha asidik koşullarda olduğu pH'ın 2-4 arasında olmasının en uygun koşullar olduğu belirtilmiştir. Bununla beraber, Abollino vd. (2003)'nin çalışmasında montmorillonit için gerçekleştirilen deneylerde Cr, Ni, Mn ve Zn için düşük asidik pH'larda adsorpsiyonun %80 oranında gerçekleştiği; Cd, Pb ve Cu içinse bu değerlere ulaşabilmek için pH değerinin 5'ten yüksek olması gerektiği belirtilmiştir [25]. Bu çalışmada ölçülen pH değerleri, literatürde bildirilen adsorpsiyon mekanizması için en verimli pH değerlerinden yüksektir. KBK-H örneğine ait çıkış sularının pH değerleri 8'den yüksektir hatta bazen 9'u geçtiği görülmektedir. Bu durum, metaller için çökelmenin gerçekleştiği pH ortamına denk gelindiği ve adsorpsiyon mekanizması için çok da verimli olmayan bir ortama girildiğini işaret etmektedir.

Çıkış sularının EC değerlerinin başlangıç sıvısının EC değerine oranı incelendiğinde ise, tüm örneklerde beklendiği üzere ani bir düşüş sonrası dengeleme belirten bir artış gözlenmektedir. Oranın 1'den küçük olması ise deneyin sonlandırıldığı anda kation değişiminin henüz tamamlanmadığına işaret etmektedir.

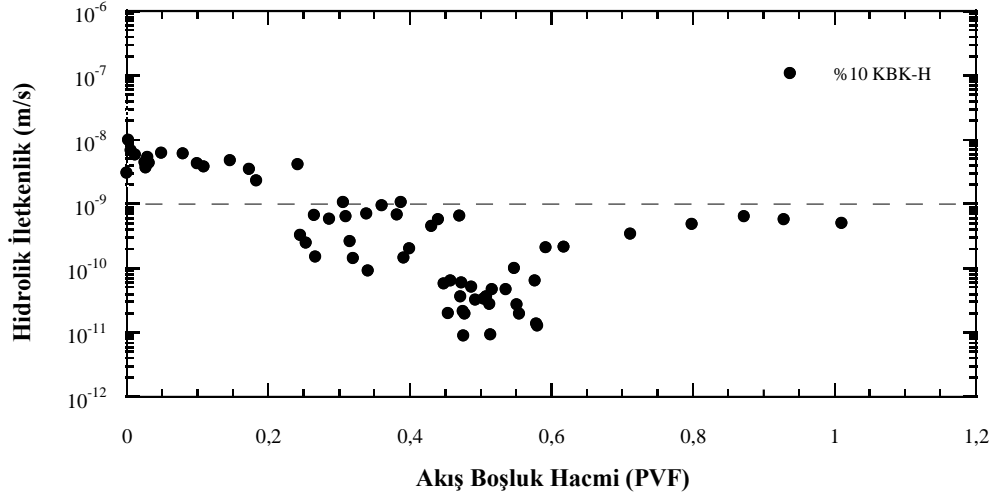


Şekil 3. KBK örneklerinin çıkış sularının Akış boşluk Hacmine göre Elektrik İletkenlik ve pH değerleri

Figure 3. Electrical conductivity and pH values of the outlet fluid of SBM with respect to pore volumes of flow

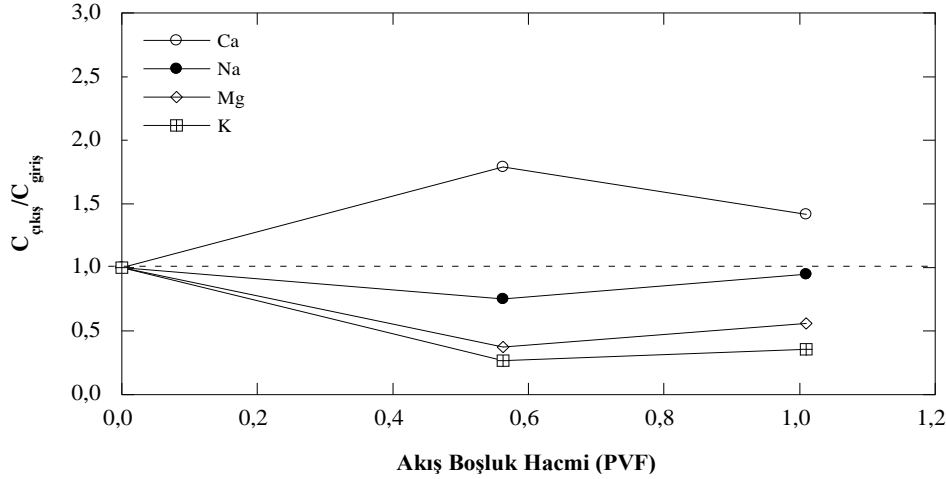
Hidrolik iletkenlik deney sonuçları ise Şekil 4'te sunulmuştur. Sızıntı suyu ile gerçekleşen deneyin başlarında bir azalış görülmüş olup ilerleyen zamanlarda dengeye geldiği belirlenmiştir. Son 5 deney verisinin ortalamasına göre KBK-H örneğinin hidrolik iletkenlik değeri 5.10^{-10} m/s olarak ölçülmüştür. Belirlenen değer, sınır değer olan 10^{-9} m/s değerinin altında olsa da kritik aşamada olduğu söylenebilir. Giriş bölümünde Şekil 1'de sunulmuş olan musluk suyu ile belirlenmiş hidrolik iletkenlik değerlerine bakıldığında %10 KBK örnekleri için ölçülen değerlerin 2.10^{-10} m/s ile 3.10^{-12} m/s arasında

değiştiği görülmektedir. Ölçülen değerlerdeki farklılık, malzemelerin farklılığının yanı sıra aynı malzeme ve farklı başlangıç kompaksiyon su içeriklerinden de kaynaklanmaktadır. Bu çalışmadaki malzeme ve başlangıç kompaksiyon su içeriği (optimumun ıslak tarafı) ile benzer olan veri sonucu [26] karşılaştırıldığında sızıntı suyu ile gerçekleştirilen hidrolik iletkenlik deney sonucunda ölçülen değerlerin musluk suyu ile ölçülene göre artış gösterdiği belirlenmiştir. Sızıntı sularının kimyasının hidrolik iletkenliği arttırdığı görülmüştür



Şekil 4. Hidrolik iletkenlik deney sonuçları

Figure4. Hydraulic conductivity test results

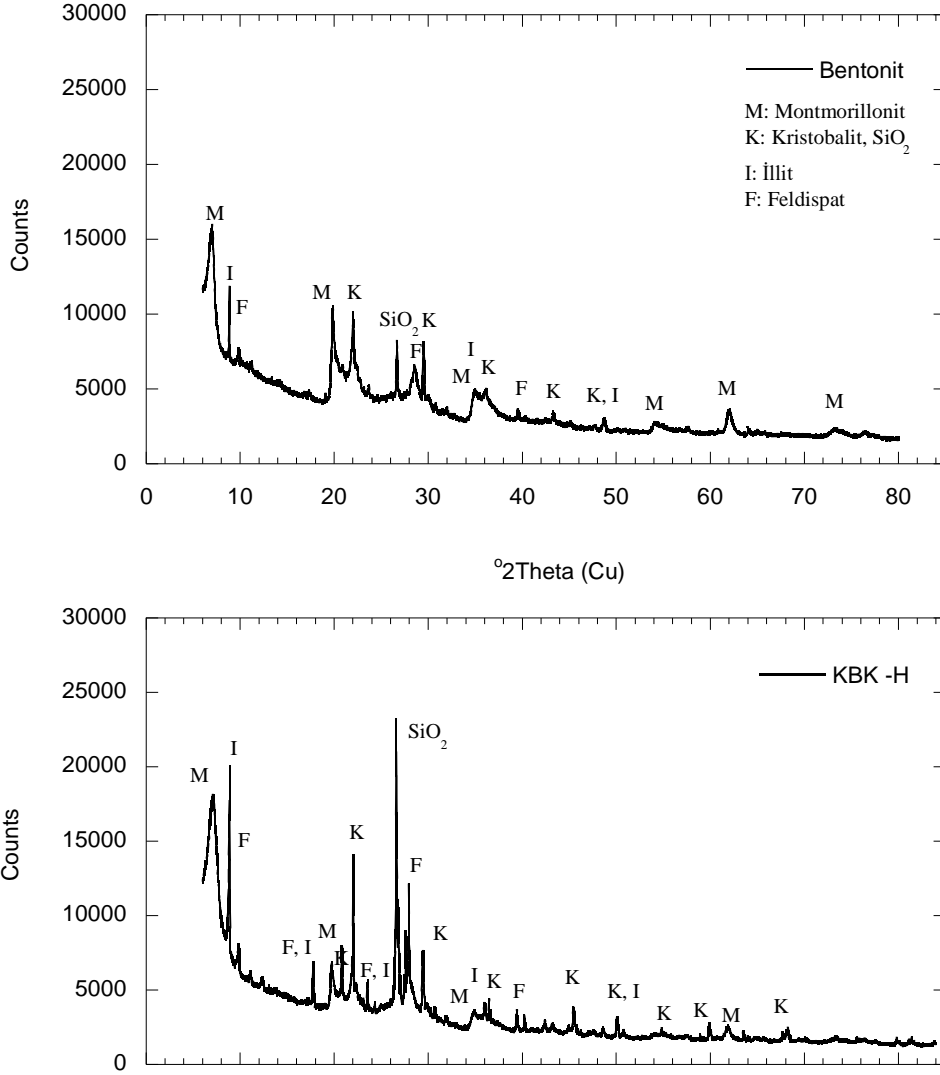


Şekil 5. Giriş ve çıkış sıvılarında bazı alkali ve toprak alkali metalleri konsantrasyonlarının oranı

Figure 5. Ratio of the outlet and inlet fluids concentrations for some alkali and alkaline earth elements

Harmandalı sızıntı suyu geçirilmiş %10 KBK örneğine ait çıkış sıvısı başlangıç sızıntı suyu ile karşılaştırılıp değerlendirildiğinde yaklaşık 0,6 akış boşluk hacmine kadar Ca hariç diğer alkali ve toprak alkali metallerin azaldığı, diğer bir deyişle KBK-H'nin bu iyonları bünyesinde tuttuğu ve Ca iyonunu ise bıraktığı görülmektedir (Şekil 5). Ca iyonu 0,6 akış boşluk hacmine kadar ciddi bir artış göstermiş ardından da hızlı bir azalma eğiliminde olmuştur. Diğer iyonlar için de 0,6 akış boşluk hacmine kadar, Ca iyonuna ters şekilde, bir azalma söz konusu iken bu orandan sonra artış gözlenmeye başlamıştır. Diğer bir deyişle %10 KBK-H örneği deneyin başından ortalarına kadar bünyesindeki Ca elementini bırakmış, sonrasında ise bu işlem tersine dönmüştür. KBK örneğinin önceki çalışmalarda musluk suyu ile belirlenen hidrolik iletkenlik değerlerine bakıldığında (Şekil 1) ortalama 10^{-11} m/s civarında olduğu görülmektedir, bu çalışma ile aynı su içeriği ve sıkışma parametreleri ile sıkıştırılmış örneklerde ise musluk suyu ile belirlenmiş hidrolik iletkenlik değerinin 10^{-12} m/s değerine kadar düştüğü görülmektedir. Sızıntı suyu geçirilmiş aynı başlangıç koşullarına sahip KBK-H'da ise hidrolik

iletkenlik değerinin artış göstererek 10^{-9} m/s mertebelerine yaklaştığı görülmektedir. Bunun bir sebebi olarak yukarıda bahsi geçen Ca^{+2} ile Na^{+} iyonlarının yer değiştirmesi gösterilebilir. Bu örneğin hidrolik iletkenlik grafiğine (Şekil 4) bakılacak olursa yaklaşık 0,6 akış boşluk hacmine kadar azalma eğiliminde olan hidrolik iletkenlik değerinin 0,6 akış boşluk hacminden sonra arttığı görülecektir. Bu durum, sızıntı sularının karışık kimyası göz önüne alındığında elbette ki tek sebep olarak gösterilemez. Bununla beraber, iyon konsantrasyonunun artması ile hidrolik iletkenliğin de artması diğer çalışmalarda da gösterilmiştir [27-29]. Bunlara ek olarak pH 9 değerini geçtiğinde karışımdaki kilin mineralojik yapısının etkilenmiş olabileceğini de düşündürmektedir. Dolayısı ile, karışımın içerisindeki kilin sızıntı suyu geçirilmeden önceki ve sonraki mineralojik durumunu belirlemek üzere XRD analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 6'da sunulmuştur. Şekil 6'daki Bentonit etiketli grafik, kullanılan kile ait başlangıç koşulunu anlatmakta iken KBK-H etiketli grafik ise sızıntı suyu geçirilmiş örnekten elenen kile ait durumu anlatmaktadır.



Şekil 6. Başlangıç ve hidrolik iletkenlik deneyi sonrasındaki kile ait XRD grafikleri

Figure 6. The XRD graphics of clay before and after the hydraulic conductivity test

Şekil 6'da en çok dikkat çeken unsur montmorillonit piklerindeki azalış olmuştur. Hatta bazı piklerin yok olduğu da gözlenmiştir. Sızıntı suyu kimyasının kil mineralojisini değiştirdiği XRD grafiklerinden açıkça görülebilmektedir. XRD grafiklerindeki pikleri değerlendirirken, XRD için çözüm yapılan sistemin kütüphanesindeki mevcut kayıtlı bilgilere göre de değişiklik gösterebileceği unutulmamalıdır. K harfi ile gösterilen mineraller genel olarak kristobalit, kuvars ve SiO₂ içeriğidir ve bu içerikteki piklerde ciddi miktarda artış gözlenmiştir. KBK-H sonuçlarında illit mineralinin artışı da dikkat çekicidir. Killerdeki mineral yerleşimi, yüzey pozisyonu gibi pek çok etken XRD sonuçlarını etkilemektedir [30] fakat ilk bulgular açısından sızıntı suyuna maruz kalan montmorillonit mineralinin yapısının değiştiği görülmektedir. Bu durum, sızıntı suyu geçirilen örnekteki hidrolik iletkenlik değeri artışının açıklanmasına da katkıda bulunmaktadır. Bununla beraber, konu üzerine ayrıntılı çalışmaya da ihtiyaç olduğu açıktır.

Sonuç olarak, çalışmanın amacı olan KBK örneklerinin sızıntı suyu etkisi altında hidrolik iletkenlikleri tespit edilmiş ek olarak da bazı alkali ve toprak alkali metallerinin değişimi ve sızıntı suyunun kil mineralinin yapısına etkisi incelenmiştir. KBK'nın geçirimsiz tabaka olarak kullanımının bu çalışmada kullanılan sızıntı suyu için uygun olduğu görülmüştür.

4. Sonuçlar

Kum bentonit karışımı üzerinde yakın yörelerden elde edilmiş bir sızıntı suyu için gerçekleştirilen hidrolik iletkenlik deney sonuçları sunulmuştur. Sızıntı sularının zemin ile etkileşimi sonucunda farklı kimyasal sonuçların elde edilmesi, her düzenli atık depolama sahasındaki karakteristik sızıntı suyuna göre geçirimsiz tabaka malzemesi seçiminin önemini vurgulamaktadır. Musluk suyu ile gerçekleştirilen deneylerin bir referans noktası olduğu unutulmamalı ve her uygulamaya özel geçirimsiz tabaka için önerilen malzemeler o bölgeye ait sızıntı suyu ile test edilmelidir. Pek çok saha uygulamasında kriter olarak musluk suyu ile gerçekleştirilen değerlerin alınması, kirlenmeye maruz kaldığında özelliğini kaybeden ya da kısmi olarak yitiren malzemeler için oldukça tehlikeli çevresel sonuçların doğurabileceğini göstermektedir.

Çalışma sonucunda elde edilen başlıca bulgular aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Ege Bölgesi'ndeki bir katı atık deposuna ait sızıntı suları incelenmiş ve bazı kimyasal özellikleri sunulmuştur.
- KBK'nın sızıntı suyu etkisi altındaki hidrolik iletkenlik değerleri, geçirimsiz tabakalar için kriter olan 10^{-9} m/s değerini sağlamıştır. %10 KBK-H için final hidrolik iletkenlik

değeri 5.10^{-10} m/s olmuştur. Bu süreç içinde de kilin mineralojik yapısında değişiklikler tespit edilmiştir.

- Sızıntı sularının giriş sıvılarının pH değerleri baziktir. Çıkış sıvılarının pH değerleri ise artarak yer yer 9'u geçmiştir. Bu pH ortamı kil zemin için uygun olan adsorpsiyon ortamına uzaktır. Bununla beraber, Na^+ ve Ca^{+2} iyonlarının yer değiştirdiği belirlenmiştir.
- Hidrolik iletkenlik deneyleri bir akış boşluk hacmine ulaşınca sonlandırılmıştır dolayısı ile verilen sonuçlar uzun dönem değerlendirmesini içermemektedir.
- Deneysel süresinde örneklerde bakteriyel oluşuma rastlanmamıştır, uzun dönem analizlerinde bakteri oluşması ile hidrolik iletkenlik değerlerinde bir azalma beklenebilir. Gelecek çalışmalarda uzun dönem hidrolik iletkenlik değerleri araştırılabilir.
- Gelecek çalışmalar için sızıntı suyunun bentonite olan mineralojik etkisinin hangi koşullarda ve nasıl gerçekleştiği konusunun ayrıntılı olarak araştırılması da kuvvetle önerilmektedir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma kısmen Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: 2018-060. Yazar, proje çalışanlarına hidrolik iletkenlik deneyinin gerçekleştirilmesi sırasında katkılarından dolayı teşekkür eder.

Yazar, Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Götetik ABD'a sızıntı suyu temini katkısından dolayı teşekkür eder.

Kaynaklar

- [1] Kraus, J.F., Benson, C.F., Erickson, A.E., Chamberlain, E.J. 1997. Freeze Thaw Cycling and Hydraulic Conductivity of Bentonitic Barriers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123 (3), 229-238.
- [2] Tay, Y.Y., Stewart, D.I., Cousens, T.W. 2001. Shrinkage And Desiccation Cracking in Bentonite-Sand Landfill Liners. *Engineering Geology*, 20 (1-4), 263-274.
- [3] Cho, W.-J., Lee, J.O. and Kang, C.-H. 2002. Hydraulic Conductivity of Compacted Soil-Bentonite Mixture for A Liner Material in Landfill Facilities. *Korean Society of Environmental Engineers*, 7 (3), 121-127.
- [4] Komine, H. 2004. Simplified Evaluation On Hydraulic Conductivities Of Sand-Bentonite Mixture Backfill. *Applied Clay Science*, 26 (1-4), 13-19.
- [5] Meer, S.R., Benson, C.H. 2007. Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners Exhumed from Landfill Final Covers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133 (5), 550-563.
- [6] Akgün, H. 2010. Geotechnical Characterization and Performance Assessment of Bentonite / Sand Mixtures for Underground Waste Repository Sealing. *Applied Clay Science*, 49 (4), 394-399.
- [7] Ören, A.H., Kaya, A., Kayalar, A.Ş. 2011. Hydraulic Conductivity of Zeolite Bentonite Mixtures in Comparison to Sand Bentonite Mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 48 (9), 1343-1353.
- [8] Akcanca, F., Aytakin, M. 2014. Impact of Wetting-Drying Cycles on The Hydraulic Conductivity of Liners Made of Lime-Stabilized Sand-Bentonite Mixtures for Sanitary Landfills. *Environmental Earth Sciences*, 72 (1), 59-66.
- [9] Varank, G., Demir, A., Adar, E., Bilgili, M.S., Top, S., Güvenç, Y.S., Özçoban, M.Ş. 2017. Investigation of Liner Systems in Transport of Organic and Inorganic Contaminants In Sanitary Landfill: A Case Study. *Celan - Soil, Air, Water*, 45 (1), 1-8.
- [10] Kleppe, J.H., Olson, R.E. 1985. Desiccation Cracking of Soil Barriers. ASTM, Special Technical Publication, 874, 263-275.
- [11] Hong, C.S., Shackelford, C.D. 2017. Long-Term Column Testing of Zeolite-Amended Backfills. I: Testing Methodology and Chemical Compatibility. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 143 (9), 04017050.
- [12] Bradshaw, S.L., Benson, C.H. 2013. Effect of Municipal Solid Waste Leachate on Hydraulic Conductivity And Exchange Complex Of Geosynthetic Clay Liners. *J. Geotech. Geoenviron.*, 140 (4), 1-17.
- [13] Benson, C.H., Chen, J.N., Edil, T.B., Likos, W.J. 2018. Hydraulic Conductivity of Compacted Soil Liners Permeated with Coal Combustion Product Leachates. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 144 (4), 1-15.
- [14] Adhikari, B., Dahal, K. R., Khanal, S.N. 2014. A Review of Factors Affecting the Composition of Municipal Solid Waste Landfill Leachate. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, 3 (5), 272-281.
- [15] Luo, H., Zeng, Y., Cheng, Y., He, D., Pan, X. 2020. Recent Advances in Municipal Landfill Leachate: A Review Focusing on Its Characteristics, Treatment and Toxicity Assessment. *Science of the Total Environment*, 703, 135468.
- [16] Bao, C., Jiaying, G., Huixin, Z. 2016. Alteration of Compacted GMZ Bentonite by Infiltration of Alkaline Solution. *Clay Minerals*, 51 (2), 237-247.
- [17] Xiang, G., Ye, W., Lv, L. 2019. Swelling Characteristics of Bentonite After Long-Term Dissolution in Alkaline Solution. *Clay Minerals*, 54 (4), 409-416.
- [18] Margat, J., Gun V.D.J. 2013. "Groundwater Around The World", CRC Press/Balkema.
- [19] Abdellah, D., Gueddouda, M.K., Goual, I., Souli, H., Ghembaza, M.S. 2020. Effect of Landfill Leachate on the Hydromechanical Behavior of Bentonite-Geomaterials Mixture. *Construction and Building Materials*, 234, 117356.
- [20] Tang, Q., Gu, F., Zhang, Y., Zhang, Y., Mo, J. 2018. Impact of Biological Clogging on The Barrier Performance of Landfill Liners. *Journal of Environmental Management*, 222, 44-53.
- [21] Chen, J., Qian, H., Yang, M., Qin, J., Qu, W. 2021. Effects Of Bacterial Activity on The Saturated Hydraulic Conductivity of Remolded Loess. *Engineering Geology*, 287, 106101.
- [22] Özçoban, M. Ş., Acarer, S., Tüfekci, N. 2022. Effect Of Solid Waste Landfill Leachate Contaminants on Hydraulic Conductivity of Landfill Liners. *Water Science and Technology*, 85 (5), 1581-1599.
- [23] Freeze, R.A., Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*, Prentice-Hall, Inc., Englewoods Cliffs, N.J. ISBN: 0-13-365312-9, pp 624.
- [24] ASTM D 5084. 2016. Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using A Flexible Wall Permeameter. The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.
- [25] Uddin, M.K. 2017. A Review On The Adsorption of Heavy Metals By Clay Minerals, With Special Focus on The Past Decade. *Chemical Engineering Journal*, 308, 438-462.
- [26] Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Sarzanini, C., Mentasti, E. 2003. Adsorption of Heavy Metals on Na-montmorillonite. Effect of pH and Organic Substances. *Water Research*, 37 (7), 1619-1627.
- [27] Ören, A.H., Durukan, S., Kayalar, A.Ş. 2014. Influence of Compaction Water Content on The Hydraulic Conductivity of Sand-Bentonite And Zeolite-Bentonite Mixtures. *Clay Minerals*, 49(1), 109-121.
- [28] Shackelford, C.D., Benson, C.H., Katsumi, T., Edil, T.B., Lin, L. 2000. Evaluating The Hydraulic Conductivity of Gcls Permeated With Non-Standard Liquids. *Geotextiles and Geomembranes*, 18 (2-4), 133-161.
- [29] Yilmaz, G., Yetimoglu, T., Arasan, S. 2008. Hydraulic Conductivity of Compacted Clay Liners Permeated with Inorganic Salt Solutions. *Waste Management and Research*, 26 (5), 464-473.
- [30] Emmanuel, E., Angraini, V., Asadi, A., Raghunandan, M.E. 2020. Interaction of Landfill Leachate with Olivine-Treated Marine Clay: Suitability For Bottom Liner Application. *Environmental Technology and Innovation*, 17, 100574.
- [31] Zhou, X., Liu, D., Bu, H., Deng, L., Liu, H., Yuan, P. 2018. XRD-based quantitative analysis of clay minerals using reference intensity ratios , mineral intensity factors, Rietveld, and full pattern summation methods : A critical review. *Solid Earth Sci.* 3, 16-29.