

KUM-BENTONİT KARIŞIMLARININ HİDROLİK İLETKENLİKLERİNİN PERLİT VE ÜLEKSİT KATKILARI VARLIĞINDA YÜKSEK SICAKLIK ALTINDA İNCELENMESİ

Esra GÜNERİ¹, Ş. Gizem ALPAYDIN¹, Yeliz Yükselen AKSOY²

¹Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

²Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

ÖZET

Katı atık ve nükleer atık depolama alanlarında, kirleticilerin çevreye yayılmasını önlemek amacıyla, düşük geçirimsizliğe sahip zeminler geçirimsiz bariyer olarak kullanılmaktadır. Bu alanlarda örtü/tampon zemin malzemesi olarak genellikle bentonit veya kum-bentonit karışımları kullanılmaktadır. Katı atık depolama alanlarında gerçekleşen kimyasal tepkimeler sonucunda ve nükleer atık depolama alanlarındaki radyasyon etkisiyle bu zeminlerde termal değişiklikler, genellikle de sıcaklık artışları meydana gelmektedir. Literatürde yapılan çalışmalara göre sıcaklık artışıyla birlikte zeminlerin hidrolik iletkenliklerinin arttığı görülmüştür. Bentonit/kum veya bentonit karışımlarına termal dayanıklılığı yüksek katkı malzemeleri eklenerek artan sıcaklık etkisi ile hidrolik iletkenlik değerlerindeki artışlar engellenebilir. Perlit ve bir bor minerali olan üleksit termal dayanımı yüksek katkı malzemeleridir ve endüstride birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada kum-bentonit karışımlarının %10 perlit ve %10 üleksit katkısı varlığında hidrolik iletkenlik davranışları yüksek sıcaklık altında incelenmiştir. Hidrolik iletkenlik deneyleri esnek duvarlı permeametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler oda sıcaklığında (20°C) başlatılıp, akış kararlı hale geldiğinde zemin sıcaklığı sırasıyla 40°C ve 60°C değerlerine arttırılmıştır. Perlit ve üleksit katkısı ile kum-bentonit karışımının hidrolik iletkenlik değerlerinde oda sıcaklığı ve 80°C altında artış gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Bor, hidrolik iletkenlik, kum-bentonit karışımı, perlit, sıcaklık.

1.GİRİŞ

Kentsel katı atık ve nükleer atık depolama alanları atıkların bertaraf edilerek çevreye olan zararlarını azaltmak için tasarlanır. Katı atık depolama alanlarındaki sızıntılardan çıkan kirleticiler sızıntı suyuna karışarak insan sağlığı ve çevre açısından birçok probleme yol açabilir (Pajoo ve diğ., 2017; Renou ve diğ., 2008). Bu yüzden, bu alanlarda bariyer sistemi oluşturmak zararlı maddelerin yeraltı suyuna sızmasını önlemek amacıyla oldukça önemlidir (Tang ve diğ., 2011). Nükleer atık depolama alanlarında ise zamanla yeraltı suyu atığa nüfuz edebilir ve radyonüklitleri çözebilir ve bunun sonucunda biyosfere doğru taşıyabilir. Radyonükleid göç oranını geciktirmek ve en aza indirmek için koruyucu bariyer kullanılmalıdır (Zhou ve diğ., 2013).

Sıkıştırılmış kum-bentonit karışımları katı atık (Feng ve diğ., 2019; Wang, 2010) ve nükleer atık depolama (Chen ve diğ., 2018; Zhou ve diğ., 2013) alanlarında bariyer sistemi olarak kullanılmaktadır. Sıkıştırılmış kil zeminler düşük hidrolik iletkenlik gibi birçok avantaja sahip olmasına rağmen yüksek büzülme ve genleşme potansiyeline sahiptir (Di Maio ve diğ., 2004). Bentonit içeriğindeki suyu kaybettiğinde büzülür ve bunun sonucunda çatlaklar meydana gelir. Çatlamış zeminin hidrolik iletkenlik değeri artar (Albrecht ve Benson, 2001) ve bunun sonucunda çevresel kirlenme riski oluşur. Bariyerlerin performansı kum ve bentonit karıştırılarak iyileştirilebilir (Cui ve diğ., 2012; Saba ve diğ., 2014). Yapılan çalışmalar %10 ve %20 bentonit içeren sıkıştırılmış kum-bentonit karışımlarının kurumaları sırasında büzülmenin %4 oranından az olması durumunda karışımlarda kuruma çatlakları meydana gelmediğini göstermektedir (Tay ve diğ., 2001). Omid ve diğerleri (1996) kuruma altında hacimsel büzülme değeri %11 den az olan zeminlerin hidrolik iletkenlik performansının kararlı olacağını rapor etmişlerdir (Omid ve diğ., 1996).

Atık depolama alanlarında, atıkların biyokimyasal süreçler veya nükleer atıklar nedeniyle sıcaklık açığa çıkar. Sıcaklıktaki bu artış zeminin mekanik ve hidrolik özelliklerini uzun dönemde etkileyebilir (Sinha ve Kusakabe, 2008). Literatürde yapılan çalışmalara göre kentsel katı atık depolama alanlarında sıcaklığın 40-45°C'ye yükseldiği bilinmektedir (Rees, 1980). Tokyo'da yapılan bir çalışmaya göre ise atık depolama alanında 70°C'ye kadar yükselen bir sıcaklık bildirilmiştir (Yoshida ve diğ., 1999). Derin jeolojik nükleer atık depolama alanlarında aşırı uzun depolama süresi ve radyonüklidlerin bozunmasından kaynaklanan yüksek sıcaklık faktörlerinin oluşturduğu termal, hidrolojik, mekanik ve kimyasal koşullar altında bariyer sisteminin uzun dönemli işlevselliği sağlanmalıdır. Bu faktörlerden birinde değişiklik olduğu takdirde, tampon performansı etkilenebilir (Kim ve diğ., 2011). İsveç, Finlandiya gibi birçok ülkede nükleer atık depolama alanlarında tasarım limit sıcaklığı 100°C olarak alınır. Bununla birlikte bu dizayn limit sıcaklığı 200°C kadar yüksek olabilir (Gens ve Olivella, 2014). Yüksek sıcaklıklarda zemin boşluklarındaki suyun viskozitesinin termal değişimi sonucunda hidrolik iletkenlik artar (Abuel-Naga ve diğ., 2006). Sıkıştırılmış bentonitin 80°C'de hidrolik iletkenlik değerinin, 20°C'de elde edilen değerlerden 3-4 kat daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Cho ve diğ., 1999). Sıkıştırılmış bentonitlerin veya bentonitli karışımların artan sıcaklıkla geçirgenliklerinde artış gözlenmiştir ve bu artış genellikle kinematik viskozitenin termal azalmasına atfedilir (Mingarro ve diğ., 1991; Cho ve diğ., 1999). Villar ve Lloret (2004) çalışmalarında sıkıştırılmış bentonitin hidromekanik özellikleri üzerinde sıcaklığın etkisini incelemişler, sıcaklıkla hidrolik geçirgenlikte ölçülen artışın, su kinematik viskozitesindeki termal değişiklikler gözönüne alındığında beklenenden daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Bu

durum zeminin içine adsorbe edilen su ve daneler arasında bulunan su arasındaki sıcaklık farkı ile açıklanabilir (Villar ve Lloret, 2004).

Endüstride ısıya dayanıklı malzeme üretiminde en çok kullanılanlar malzemeler arasında bor mineralleri, perlit, pomza ve cam elyaf vb. sayılabilir. Perlit inşaat endüstrisi, gıda, tarım, ilaç, kimya ve metalurji gibi birçok sektörde kullanılan bir malzemedir. Genleştirilmiş perlit, volkanik kökenli amorf bir alüminosilikat olan ham perlitten üretilir. Oldukça gözenekli bir yapıya, düşük yoğunluğa, düşük maliyete ve iyi termal güvenilirliğe sahiptir (Karaman ve diğ., 2011). Perlitin kimyasal yapısı SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , Na_2O , K_2O , MgO gibi bileşikler içerir (Mekaddem ve diğ., 2019). Endüstride ısıya dayanıklı cam üretiminde, elektronik malzemeler ve uzay araçlarında kullanılmak üzere yüksek dayanımlı camların üretiminde bor mineralleri kullanılmaktadır. Bor minerali, camların ısıl genişmesini önemli ölçüde azaltır, camı asit ve çiziklere karşı korur. Bu çalışmada kullanılan ve yapı olarak lif demetlerinden meydana gelen üleksit, sodyum ve kalsiyum mineralleri bakımından oldukça zengin bir bor mineralidir ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$).

Üleksit ve perlit, kum-bentonit karışımlarının yüksek sıcaklık altında mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılmaya aday katkı malzemeleridir. Bu çalışmanın amacı kum-bentonit karışımlarına üleksit ve perlit katkı malzemeleri ilave edilerek yüksek sıcaklık altında hidrolik iletkenlik performanslarının artırılmasıdır.

2. MALZEME VE METOD

2.1. Malzeme Karakterizasyonu

Bu çalışmada %10 perlit ve üleksit katkısı varlığında kum-bentonit karışımları kullanılmıştır. Bentonit Esan Eczacıbaşı Endüstriyel Hammadde Sanayi ve Ticaret A.Ş.' den, katkı maddesi olarak kullanılan perlit numunesi Pomza Export Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş.' den, üleksit ise Eti Maden İşletme Genel Müdürlüğü'nden alınmıştır. Tablo 1' de bu çalışmada kullanılan malzemelerin fiziko-kimyasal özellikleri verilmiştir. Kum ve bentonit numuneleri 24 saat boyunca etüvde kurutularak deneylerde kullanılmıştır. Perlit ve üleksit örnekleri No.40 elek, kum numunesi ise No.6 eleklerden elenerek kullanılmıştır. Karışımlar hazırlanırken, toplam kuru karışımın % 10'u ağırlıkça üleksit veya perlit olacak şekilde karışımlar oluşturulmuştur. Perlitin ve üleksitin doğal su içerikleri, deneylere başlamadan önce belirlenmiştir. Örnekler isim verilirken, bentonit "B", kum "S", perlit "PE" ve üleksit "U" olarak kısaltılmıştır. Örneğin, 10PE-9B-81S karışımı %10 perlit, %9 bentonit, %81 kum içerir. Benzer şekilde 10U-9B-81S karışımı %10 üleksit, %9 bentonit, %81 kum içermektedir.

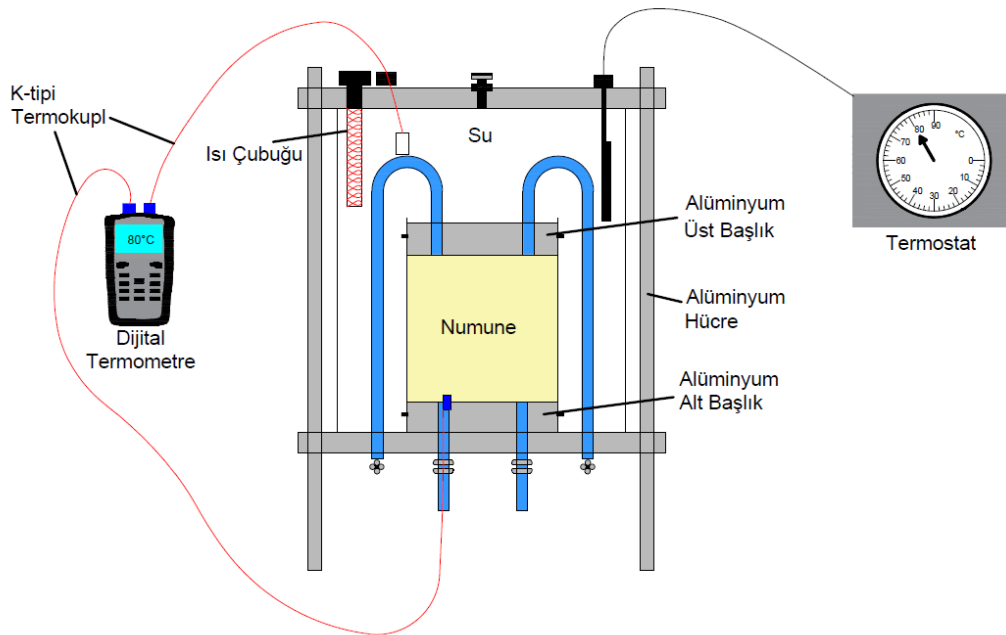
Tablo 1. Deneylerde kullanılan malzemelerin fiziko-kimyasal özellikleri

	Bentonit	Kum	Perlit	Üleksit
Özgül ağırlık	2.70	2.63	1.50	1.98
Likit limit (%)	476.0	-	375	33.35
Plastik limit (%)	70.10	-	NP	25.12
pH	9.50	-	8.96	9.13

2.2. DeneySEL Yöntemler

Bu çalışmada %10 kum-bentonit karışımlarına %10 perlit ve %10 üleksit ilavesi yapılarak, Standart Proctor kompaksiyon deneyleri ASTM D698 (2012) standardına göre yapılmıştır. Deneyler öncesinde numuneler belirli su içeriklerinde hazırlandıktan sonra hava almayacak şekilde kapalı kaplara konularak 24 saat bekletilmiştir.

Hidrolik iletkenlik deneyleri ASTM D5084-16a (2016) standardına göre esnek duvarlı permeametre hücreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hidrolik iletkenlik deneylerinde karışımlar, $w_{opt}+2\%$ su içeriği değerinde hazırlanmıştır. Deneylere başlamadan önce numuneler, hava almayacak şekilde kapalı kaplara konularak 24 saat bekletilmiştir. Numuneler $w_{opt}+2\%$ su içeriğine karşılık gelen kuru birim hacim ağırlık değerinde sıkıştırıldıktan sonra permeametreye yerleştirilirken numunenin alt ve üst kısmına geotekstiller konulmuştur. Daha sonra numunenin çevresinde sızmayı engellemek için lateks membran ve O-ringler kullanılmıştır. Hidrolik iletkenlik deneyleri, zemin boşluk hacmi cinsinden akış miktarı olarak ifade edilmiştir. Hidrolik iletkenlik deneyleri oda sıcaklığı ve 80°C olarak iki farklı sıcaklık koşulu altında gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklık altında gerçekleştirilen deneylerde ısı çubuğu ile hücre içerisindeki su ısıtılarak zemin içerisinde sıcaklık artışı sağlanmıştır. Suyun içerisine daldırılan termostat aracılığıyla sıcaklık 80°C olarak sabit tutulmuştur. Üst başlık, alt başlık ve hücreler alüminyum malzemeden imal ettirilmiştir. Deney süresince hücrenin üst kısmından K-tipi termokupl suyun içine daldırılarak ve diğer ucu da dijital termometreye takılarak suyun sıcaklığı ölçülmüştür. Yüksek sıcaklık altında yapılan deneyler süresince zemin sıcaklığını ölçmek amacıyla geotekstil üzerine termokupl geçebilecek büyüklükte bir delik açılmıştır. Bu delikten geçirilen termokupl ile zeminin sıcaklığı da deney boyunca ölçülebilmektedir. Termokupllar dijital termometrelere bağlanmış ve sıcaklık değerleri zamana bağlı olarak kaydedilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Hidrolik iletkenlik deney düzeneğinin şematik gösterimi

3. HİDROLİK İLETKENLİK DENEY SONUÇLARI

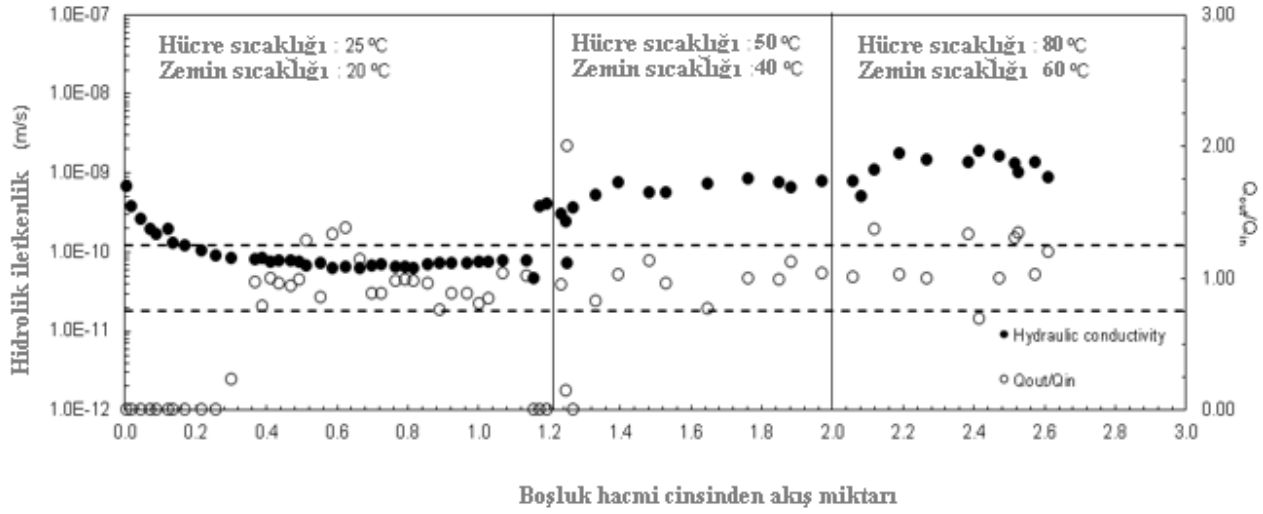
Bu çalışmada %10 perlit ve %10 üleksit katkılı 10B-90S karışımlarının, Standart Proctor deneyinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ve optimum su içerikleri Tablo 2’de verilmiştir. %10 perlit katkısı %10 bentonit-kum karışımının birim hacim ağırlığını azaltırken, %10 üleksit katkısının arttırdığı görülmüştür. Su içerikleri ise katkısız karışıma göre perlit ile artarken, üleksit ile azalmıştır.

Tablo 2. Karışımların maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği değerleri

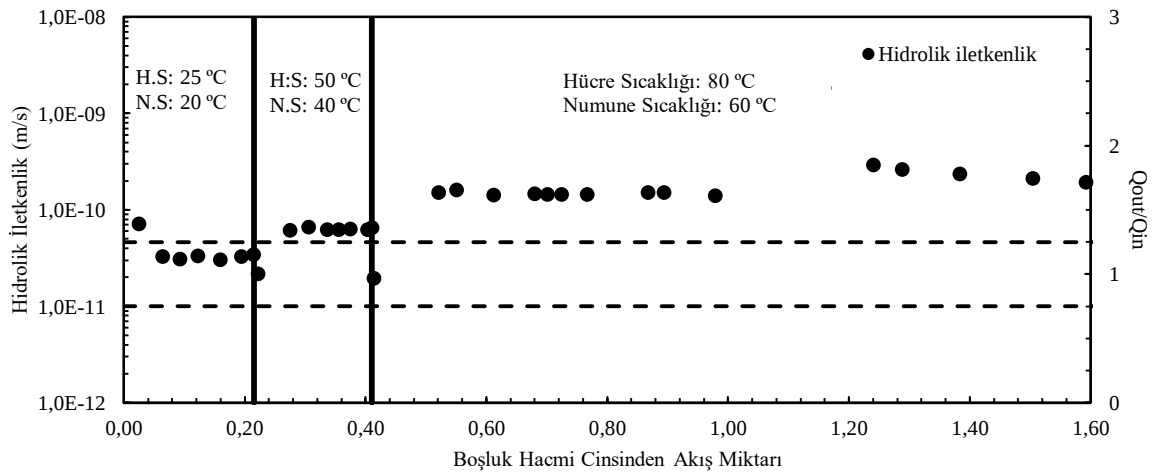
Karışım	$\rho_{d,max}$ (kN/m ³)	w_{opt} (%)
10B-90S	16.19	16.5
9B-10PE-81S	14.50	17.5
9B-10U-81S	16.78	13.5

Şekil 2 ve Şekil 3’de sırasıyla %10 perlit ve %10 üleksit katkılı 10B-90S karışımlarının hidrolik iletkenlik deney sonuçları verilmiştir. Deney sırasında, hücre suyu sıcaklığı 25, 50 ve 80°C olacak şekilde sıcaklık kademeli olarak arttırılmıştır. Boşluk hacmi cinsinden gerekli akış hacmi değerine ulaşıldığında deney sıcaklığı arttırılarak bir sonraki aşamaya geçilmiştir. Elde edilen veriler, sıcaklık artışı ile birlikte kum-bentonit karışımlarının, iki farklı katkı maddesi varlığında hidrolik iletkenlik değerlerinin nasıl değiştiğini göstermektedir.

Esnek duvarlı permeametrede belirlenen katkısız kum-bentonit karışımının oda sıcaklığında hidrolik iletkenlik değeri 1.7×10^{-11} m/sn’dir. Oda sıcaklığında bu karışıma ilave edilen perlit ve üleksit katkısıyla hidrolik iletkenlik değeri sırasıyla 4 ve 12 kat artmıştır. 9B-10PE-81S karışımının hidrolik iletkenlik (k) değerleri 25, 50 ve 80°C için sırasıyla 7.0×10^{-11} m/sn, 7.5×10^{-10} m/sn ve 1.4×10^{-9} m/sn olarak belirlenmiştir. 9B-10U-81S karışımının ise 25, 50 ve 80°C sıcaklıklar için hidrolik iletkenlik değerleri sırasıyla 3.3×10^{-11} m/sn, 6.3×10^{-11} m/sn ve 2.1×10^{-10} m/sn olarak belirlenmiştir (Tablo 3). %10 üleksit katkılı kum-bentonit karışımı için hücre sıcaklığının 25°C den 50°C’ ye artması hidrolik iletkenlik değerini yaklaşık 2 kat arttırırken, 80°C sıcaklık altında hidrolik iletkenlik oda sıcaklığına kıyasla 6 kat mertebelerinde artmıştır. Bu değerler göstermiştir ki; kum-bentonit karışımının perlit ve üleksit katkısı varlığında artan sıcaklık etkisi ile birlikte hidrolik iletkenliği artmıştır. Bu durum, suyun viskozitesindeki azalış ve buna bağlı olarak permeabilitenin artması ile açıklanabilir.



Şekil 2. Oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık altında %10 perlit katkısı varlığında 10B-90S karışımının hidrolik iletkenlik davranışı



Şekil 3. Oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık altında %10 üleksit katkısı varlığında 10B-90S karışımının hidrolik iletkenlik davranışı

Tablo 3. Karışımların maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği değerleri

Hidrolik iletkenlik (k) (m/sn)			
Karışım	25°C	50°C	80°C
10B-90S	1.7×10^{-11}	-	-
9B-10PE-81S	7.0×10^{-11}	7.5×10^{-10}	1.4×10^{-9}
9B-10U-81S	3.3×10^{-11}	6.3×10^{-11}	2.1×10^{-10}

4.SONUÇLAR

Bu çalışmada kum-bentonit karışımlarına üleksit ve perlit katkı malzemeleri ilave edilerek zemin karışımlarının oda sıcaklığı, 40°C ve 60°C'deki hidrolik iletkenlik değerleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki; artan sıcaklık ile hem perlit hem de üleksit katkılı kum-bentonit karışımlarının hidrolik iletkenlik değerleri artmıştır. 9B-10U-81S karışımı için hücre sıcaklığının 25°C den 50°C'ye ve 80°C'ye artması ile geçirimsizlik oda sıcaklığına kıyasla sırasıyla yaklaşık 2 kat ve 6 kat mertebelerinde artış göstermiştir. 9B-10PE-81S karışımında ise bu artış yaklaşık 10 kat ve 20 kat olarak gözlemlenmiştir. Perlit ve üleksit katkıları hidrolik iletkenlik değerlerini arttırsa da, karışımlar içerisindeki bentonit oranı arttırılarak geçirimsiz bariyerler için istenilen sınır değerlere ulaşılabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Tübitak 217M553 nolu proje tarafından desteklenmektedir. TÜBİTAK'a projeye verdiği destek için teşekkür ederiz. Yazarlar 100/2000 Yükseköğretim Kurulu (YÖK) doktora bursu için teşekkür eder. Bentonit numunesi Esan Eczacıbaşı Endüstriyel Hammaddeler San. ve Tic. A.Ş.'den, perlit numunesi Pomza Export Madencilik Sanayi ve Tic. A.Ş.'den, üleksit ise Eti Maden İşletmeleri Eskişehir-Kırka tesislerinden temin edilmiştir. Malzeme destekleri için tüm firma ve kuruluşlara teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Abuel-Naga, H., Bergado, D. T., Gunturi, R., Grino, L., Rujivipat, P., & Thet, Y. (2006). Experimental Evaluation of Engineering Behavior of Soft Bangkok Clay under Elevated Temperature. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132.
- ASTM:D5084-16a (2016). Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 1–24.
- Chen, Y. G., Dong, X. X., Zhang, X. D., Ye, W. M., & Cui, Y. J. (2018). Combined thermal and saline effects on the swelling pressure of densely compacted GMZ bentonite. *Applied Clay Science*, 166(1239), 318–326.
- Cho, W.-J., Lee, J.-O., & Kang, C.-H. (1999). Influence of Salinity on The Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite. *MRS Proceedings*, 713.
- Cui, S. L., Zhang, H. Y., & Zhang, M. (2012). Swelling characteristics of compacted GMZ bentonite-sand mixtures as a buffer/backfill material in China. *Engineering Geology*, 141–142, 65–73.
- Di Maio, C., Santoli, L., & Schiavone, P. (2004). Volume change behaviour of clays: The influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state. *Mechanics of Materials*, 36(5–6), 435–451.
- Feng, S. J., Chang, J. Y., Chen, H. X., & Zhang, D. M. (2019). Numerical analysis of

- earthquake-induced deformation of liner system of typical canyon landfill. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116(September 2018), 96–
- Gens, A., & Olivella, S. (2014). Clay barriers in radioactive waste disposal. *Environmental Geomechanics*, 5(6), 845–856.
- Kim, J. S., Kwon, S. K., Sanchez, M., & Cho, G. C. (2011). Geological storage of high level nuclear waste. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(4), 721–737.
- Mohammad-pajooh, E., Weichgrebe, D., & Cuff, G. (2017). Municipal landfill leachate characteristics and feasibility of retrofitting existing treatment systems with deammonification – A full scale survey. *Journal of Environmental Management*, 187, 354–364.
- Albrecht, B. A., & Benson, C. H. (2001). Effect of Desiccation on Compacted Natural Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(1), 67–75.
- Omidi, G. H., Thomas, J. C., & Brown, K. W. (1996). Effect of desiccation cracking on the hydraulic conductivity of a compacted clay liner. *Water, Air, and Soil Pollution*, 89(1–2), 91–103.
- Rees, J. F. (1980). Optimisation of methane production and refuse decomposition in landfills by temperature control. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 30(8), 458–465.
- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150(3), 468–493.
- Saba, S., Barnichon, J. D., Cui, Y. J., Tang, A. M., & Delage, P. (2014). Microstructure and anisotropic swelling behaviour of compacted bentonite/sand mixture. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(2), 126–132.
- Sinha, A. N., & Kusakabe, O. (2008). Temperature effects on volume change of bentonite sand liner. *Australian Geomechanics*, 43(1), 75–86.
- Tang, C. S., Cui, Y. J., Shi, B., Tang, A. M., & Liu, C. (2011). Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles. *Geoderma*, 166(1), 111–118.
- Tay, Y. Y., Stewart, D. I., & Cousens, T. W. (2001). Shrinkage and desiccation cracking in bentonite-sand landfill liners. *Engineering Geology*, 60(1–4), 263–274.
- Villar, M. V., & Lloret, A. (2004). Temperature Influence on the Mechanical Behaviour of a Compacted Bentonite. *Elsevier Geo-Engineering Book Series*, 2(C), 305–310.
- Wang, J. (2010). High-level radioactive waste disposal in China: update 2010. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Yoshida, H., Tanaka, N., and Hozumi, H. (1999). Theoretical study on temperature distribution in landfills by three-dimensional heat transport model. *Proceedings Sardinia 99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium, CISA, Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, Italy 4-8 October 1999*.
- Zhou, L., Zhang, H., Yan, M., Chen, H., & Zhang, M. (2013). Laboratory determination of migration of Eu(III) in compacted bentonite-sand mixtures as buffer/backfill material for high-level waste disposal. *Applied Radiation and Isotopes*, 82, 139–144.