

YÜKSEK SICAKLIĞIN ve ETİBOR-48 KATKISININ BENTONİTİN ZEMİN-SU KARAKTERİSTİK EĞRİLERİNE ETKİSİ

THE EFFECTS OF HIGH TEMPERATURE AND ETIBOR-48 ADDITIVE ON THE SOIL-WATER CHARACTERISTIC CURVES OF BENTONITE

Şükran Gizem ALPAYDIN¹, Yeliz YÜKSELEN-AKSOY²

ÖZET

Yüksek seviyeli nükleer atıkların bertarafı için derin jeolojik depoların inşasında tampon veya dolgu malzemesi olarak sıkıştırılmış bentonit kullanılması birçok ülke tarafından önerilmektedir. Bu durum, bentonit bazlı malzemelerin şişme özelliklerinden ve son derece düşük geçirgenliklerinden kaynaklanmaktadır. Bentonit tamponun yüksek seviyeli atık (HLW) deposundaki önemli bir işlevi, kendiliğinden sızdırmaz bir bariyer görevi görmesidir. Ayrıca, hidrolik özellikler bariyerin hidrasyon oranını tahmin etmek için çok önemlidir. Sıcaklık döngüleri, bariyerin su tutma ve şişme basıncı gibi mekanik ve hidrolik özelliklerini etkiler. Bentonit, atık kutusu ile temas halindeyken kutudan yayılan yüksek sıcaklığa maruz kalacaktır. Aynı zamanda bentonit, ana kayadan gelen akış nedeniyle aşamalı olarak hidrate olacaktır. Sonuç olarak, dış kısım şişme eğiliminde olacak ve atık kutusuna temas eden bölgede ise yüksek sıcaklıktan dolayı doymamış sıkıştırılmış bentonitte yeraltı suyu hareketinin araştırılması ve kendinden sızdırmazlık özelliklerinin değerlendirilmesi için zemin-su karakteristik eğrilerinin belirlenmesi çok önemlidir. Önceki çalışmalar, sıcaklıktaki dalgalanmaların sıkıştırılmış bentonitin mühendislik özelliklerini etkilediğini göstermiştir. Bor gibi düşük termal genleşme özellikleri gösteren katkı maddeleri kullanılarak zeminin termal etkilere karşı mühendislik özelliklerini koruması sağlanabilir. Bu çalışmada sıkıştırılmış bentonite %10 ve %20 oranlarında Etibor-48 bor minerali ilave edilerek oluşturulan karışımların zemin-su karakteristik eğrileri oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık (80 °C) altında incelenmiştir. Zemin-su karakteristik eğrilerinin tayin edilmesi desikatör içerisinde buhar denge tekniği (BDT) ile gerçekleştirilmiştir. Genel olarak yüksek sıcaklık ve bor katkısı bentonitin su tutma özelliklerini azaltıcı yönde etki etmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nükleer atık, yüksek sıcaklık, bentonit, zemin-su karakteristik eğrisi, Etibor-48

¹ Doktor, Dokuz Eylül Üniversitesi, gizem.alpaydin@gmail.com (Sorumlu yazar)

² Profesör, Dokuz Eylül Üniversitesi, yeliz.yukselen@deu.edu.tr



ABSTRACT

The use of compacted bentonite as a buffer or backfill material in the construction of deep geological repositories for the disposal of high-level nuclear waste is recommended in many countries. This is due to the swelling properties of bentonite-based materials and their extremely low permeability. An important function of bentonite buffer in a high-level waste (HLW) repository is to act as a self-sealing barrier. Furthermore, the hydraulic properties are crucial for predicting the hydration rate of the barrier. Temperature cycles affect the mechanical and hydraulic properties of the barrier, such as water retention and swelling pressure. Bentonite will be exposed to the high temperature emitted from the canister when in contact with the waste canister. At the same time, the bentonite will gradually hydrate due to the flow from the bedrock. As a result, the outer part will tend to swell and the region in contact with the canister will be unsaturated due to the high temperature. For these reasons, it is very important to determine the soil-water characteristic curves to investigate the groundwater movement in unsaturated compacted bentonite and to evaluate its self-sealing properties. Previous studies have shown that temperature fluctuations affect the engineering properties of compacted bentonite. By using additives with low thermal expansion properties such as boron, the soil can be made to maintain/improve its engineering properties against thermal effects. In this study, the soil-water characteristic curves of mixtures formed by adding 10% and 20% Etibor-48 boron mineral to bentonite were investigated under room temperature and high temperature (80 °C). The determination of soil-water characteristic curves was carried out by vapor equilibrium technique (VET) in a desiccator. In general, high temperature and boron additive decreased the water retention properties of bentonite.

Keywords: Nuclear waste, high temperature, bentonite, soil-water characteristic curve, Etibor-48

1. GİRİŞ

Yüksek seviyeli nükleer atıkların bertarafı için derin jeolojik depolarda potansiyel tampon veya dolgu malzemesi olarak sıkıştırılmış bentonit kullanılması önerilmektedir (He vd., 2016; Marcial vd., 2002; Martin vd., 2006). Sıkıştırılmış bariyer malzemesi, deponun uzun vadeli işletimi sırasında termal (T), hidro (H), mekanik (M) ve kimyasal (C) süreçleri içeren karmaşık etkileşimlere maruz kalır. Bu karmaşık süreçler arasında atık kutusundaki nükleer atığın bozunmasından kaynaklanan yüksek sıcaklık, çevredeki jeolojik oluşumlardan yeraltı suyu sızması, radyonüklidlerin kutudan potansiyel sızıntısı ve bentonitin su alımı sırasında oluşan şişme basıncı bulunur (Dutt vd., 2012; Fraser vd., 2015; Xie vd., 2006). Tampon malzemelerin sızdırmazlık performansı ise bentonitin hidrolik ve şişme özelliklerine bağlıdır. Bentonit suyla temas ettiğinde şişerek boşlukları veya çatlakları etkili bir şekilde kapatır. Bu şişme özelliği yeraltı suyunun içeri girmesini önlemeye yardımcı olur ve radyoaktif atıktan çevredeki zemine radyonüklid salınımını yavaşlatır. Depo ortamında tampon malzemeler, hidrolik ve mekanik özelliklerini değiştiren yüksek sıcaklıklara uzun süre maruz kalmaktadır (Sultan vd., 2012). Sonuç olarak, sıkıştırılmış bentonitin hem termal hem de mekanik gerilmeler altında davranışını anlamak, nükleer atık depolarının uzun vadeli güvenliği için çok önemlidir (Bag ve Rabbani, 2017).



Bentonitin zemin-su özellikleri, sızdırmazlık bariyeri olarak etkinliği için hayati öneme sahiptir. Boşluk suyundaki sıcaklık kaynaklı değişiklikler, zeminlerin hidro-mekanik özelliklerini etkiler. Su tutma kapasitesini etkileyen önemli bir faktör, artan sıcaklıklarla birlikte azalma eğiliminde olan yüzey gerilimidir. Su tutma kapasitesindeki bu azalma, yalnızca yüzey gerilimindeki termal değişikliklerle tam olarak açıklanamaz (Romero vd., 2001). Örneğin, doğal zeminlerin zemin-su karakteristik eğrileri (ZSKE) (5 ila 38 °C arasındaki bir sıcaklıkta) yüzey gerilimi nedeniyle beklenenden çok daha fazla sıcaklığa bağlı bulunmuştur (Bachmann vd., 2002).

Nükleer atık bertaraf tesislerindeki bentonit karışımlarının mühendislik özelliklerinin anlaşılması ve iyileştirilmesi, özellikle yüksek sıcaklıklar altında hem verimlilik hem de güvenlik açısından kritik öneme sahiptir. Termal dayanıklılığı artırmak için potansiyel bir çözüm, ısı direnci ve düşük termal genişmesiyle bilinen bor gibi katkı maddeleri kullanılarak zeminin termal etkilere karşı mühendislik özelliklerini korumasını sağlamak olabilir. Dünya üzerinde elementel halde bulunmayan bor, doğada oksijen ve diğer elementlerle bağlanarak kolemanit, tinkal ve üleksit gibi mineralleri oluşturmaktadır. Bor, camın termal genişleme özelliklerini iyileştirir, asit ve çizilmelere karşı koruma sağlar ve titreşim, yüksek sıcaklık ve sıcaklık şoklarına karşı direnç sağlar (Özkan vd., 1997). Günümüzde bor bileşiklerinin üretimi, nükleer teknoloji, cam ve seramik endüstrisi ve tarımdaki talep nedeniyle artmıştır (Alkan ve Doğan, 2004; Demir vd., 2011).

Bu çalışma, yüksek sıcaklığın bentonitin su tutma kapasitesini nasıl etkilediğini araştırmaya odaklanmıştır. Ayrıca, bentonitin yüksek sıcaklık altındaki performansını artırmak için, içine bor minerali olarak Etibor-48 minerali ilave edilmiştir. Bentonitin ve bor katkılı bentonit karışımlarının su tutma kapasitesi Buhar denge tekniği (BDT) ile hem oda sıcaklığında hem de 80 °C'de belirlenmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

Bu çalışmada kalsiyum içerikli bir bentonit ve bir bor minerali olan Etibor-48 (E-48) kullanılmıştır. Etibor-48 (E-48), Türkiye' Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Kullanılan malzemelerin fizikokimyasal özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Bentonit ve E-48 mineralinin fiziko kimyasal özellikleri

Özellik	Ca-Bentonit	Etibor-48
Özgül Ağırlık	2.60	1.82
Likit Limit (%)	270	-
Plastik Limit (%)	63	-
Plastisite İndeksi (%)	207	-
Doğal su içeriği (%)	6-8	11-13
pH	9.13	9.25
-No. 200 (%)	100	39.60

Bentonit-bor karışımlarında E-48, bentonit numunesinin toplam kuru ağırlığının %10 ve %20'sini oluşturmuştur. Numunelerin isimlendirilmesinde katkı maddesi içeriği ve malzemelerin baş harfleri esas alınmıştır. Örneğin, B10E48 olarak adlandırılan bir karışım, bentonitin kuru ağırlığına göre %10 E-48 mineralini içermektedir.



2.2. Deneysel Yöntemler

Bu çalışmada, sıkıştırılmış bentonitin ve bor minerali Etibor-48 (E-48) katkılı bentonit karışımlarının su tutma kapasiteleri oda sıcaklığı ve 80 °C'de belirlenmiştir. Numuneler, 30 mm çapında ve 10 mm yüksekliğinde özel olarak tasarlanmış halkalar içerisinde, tek eksenli deney aparatı ile sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Sıkıştırma işlemi için, yaklaşık 55 MPa basınç uygulanmış ve bu da numuneler için tutarlı bir kuru yoğunluk değeri ($1.4 \pm 0.1 \text{ Mg/m}^3$) sağlamıştır. ZSKE serbest hacim koşulu altında BDT kullanılarak incelenmiştir. BDT sıkıştırılmış numunelerin nemlenme ve kuruma yollarını belirlemek için kullanılmış ve bağıl nemi kontrol etmek amacıyla doymuş tuz çözeltilerinden faydalanılmıştır. Bu çalışma için kalsiyum nitrat (CaNO_3), sodyum nitrit (NaNO_2), sodyum klorür (NaCl), potasyum klorür (KCl), çinko sülfat (ZnSO_4) ve potasyum sülfat (K_2SO_4) ile doymuş tuz çözeltileri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler doymuş tuz çözeltisi desikatör içerisine alındıktan sonra önce bu tuzlarla nemlendirilmiş, ardından aynı tuz çözeltileri kullanılarak ters sırayla kuruma işlemine tabi tutulmuştur.

Bu çalışmada, numuneler arasındaki ilk emme farklılıklarının etkilerini en aza indirmek amacıyla her numune için küçük desikatör (küçük kavanozlar) kullanılmıştır. Küçük desikatörlerin tercih edilmesinin bir diğer nedeni de su içeriği açısından dengeye ulaşma süresini en aza indirmektir. Bu nedenle, kavanozlar sızdırmazlık için sıkıca kapatıldıktan sonra, deney sırasında sabit koşulları sağlamak için %70 sabit nem ve 25 °C sıcaklığa sahip bir inkübatöre yerleştirilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Deneysel sistem a) inkübatör, b) Numunelerin inkübatöre yerleştirilmesi

Kavanozlara yerleştirilen numuneler periyodik olarak hassas terazilerde tartılmıştır. Hidrasyon nedeniyle 0.01 g'dan daha az bir ağırlık değişimi kaydedildiğinde, numune hemen daha yüksek bağıl neme sahip doymuş tuz çözeltisi içeren başka bir kavanoza aktarılmıştır. Nemlenme yolu tamamlandıktan sonra, aynı prosedür kuruma yolu için ters sırada uygulanmıştır. 80 °C'de ZSKE'nin belirlenebilmesi için numuneler oda sıcaklığındakilere benzer şekilde hazırlanmıştır. 80 °C'deki yüksek sıcaklık testleri için deney düzeneğinde inkübatör yerine etüv kullanılmıştır. Yüksek sıcaklıklarda tuz çözeltilerinin bağıl nemindeki değişiklikler nedeniyle, numuneyi nemlendirmek için seçilen tuz çözeltileri sırasıyla CaNO_3 , NaNO_2 ve NaCl olup düşük bağıl nemden yüksek bağıl neme doğru sıralanmıştır.

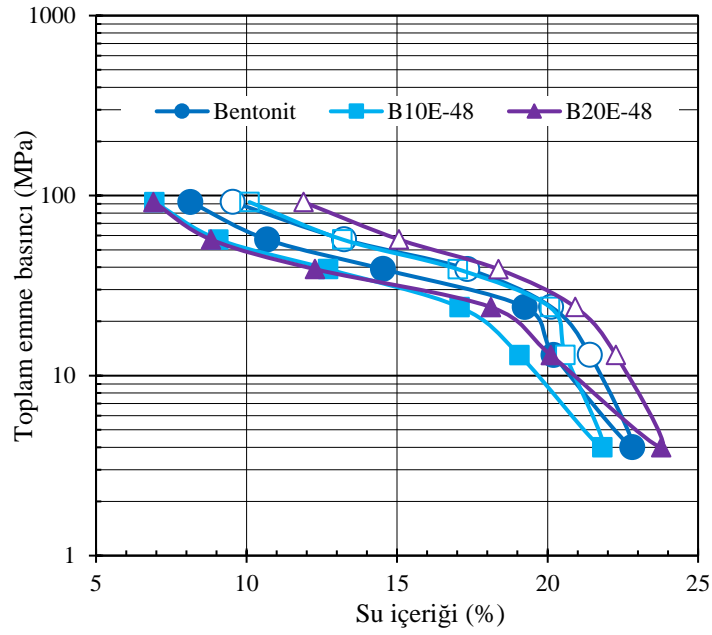


3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Sıkıştırılmış bentonit ve %10 ve %20 E-48 katkı bentonit karışımlarının ZSKE'leri, oda sıcaklığında ve 80 °C'de buhar dengesi tekniği (BDT) kullanılarak belirlenmiştir. Farklı emme basıncı değerlerinde dengeye gelen bentonit karışımlarının E-48 katkıları varlığında oda sıcaklığında zemin-su karakteristik eğrileri Şekil 2'de sunulmaktadır. Karışımlar öncelikle CaNO_3 doygun tuz çözeltisinde tutulmuştur. Buna göre ilk olarak %51 bağıl nem değeri ile 92 MPa emme basıncına karşılık gelen CaNO_3 tuz çözeltisinde dengede olan numuneler incelendiğinde katkısız bentonit numunesinin su içeriği değeri artarak %8.1 değerine ulaşmıştır. Bu nemlenme, hidrate olan bentonit numunesinin başlangıçta 92 MPa değerinden yüksek emme basıncı değerinin olduğunu göstermektedir. Çünkü bir numune için tuz çözeltisi içerisinde su içeriği değeri düştükçe (kurudukça) bu durum başlangıçta numunenin emme basıncının çözeltinin karşılık geldiği emme basıncı değerinden daha yüksek olduğu anlamına gelir. Nemlenme yolu üzerindeki nihai tuz çözeltisine (K_2SO_4) karşılık gelen emme basıncı değeri 4 MPa olmuştur. Bu çözeltide katkısız bentonitin su içeriği %22.8 olarak elde edilmiştir. Kuruma yolu nemlenme yolu ile örtüşmemekle birlikte her zaman bütün karışımlar için kuruma karakteristik eğrisi ıslanma eğrisinin üzerinde olmuştur. Örneğin, Şekil 3'te gösterildiği gibi, katkısız bentonitin %15 su içeriği değerinde, nemlenme yolundaki emme basıncı 37 MPa iken, kuruma yolunda aynı su içeriğinde 50 MPa değerine yükselmiştir. Ayrıca, bentonitin CaNO_3 çözeltisindeki su içeriği nemlenme yolunun başında %8.1 iken kuruma yolunun sonunda %9.6 değerine yükselmiştir.

E-48 katkı numunelerin başlangıç tuz çözeltisinde hafif bir kuruma sergilediği belirlenmiştir. Bunun anlamı bu karışımların başlangıç durumunda emme basınçlarının 92 MPa değerinden daha düşük olmasıdır. E-48 katkı numunelerin aynı su içeriği için emme basıncı değerleri, nemlenme yolu için katkısız bentonite kıyasla daha düşük olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte %15 su içeriği değerinden daha düşük değerlerde %10 ve %20 E-48 katkı numunelerin nemlenme eğrileri çakışık olarak elde edilmiştir. Su içeriği değeri arttıkça eğriler birbirinden uzaklaşmaktadır. Ayrıca kuruma yolunun sonunda, E-48 katkı numunelerin su içeriği değerleri %10-12 aralığında olmuştur ve kuruma yolu tamamlandığında E-48 katkı numunelerin bentonite kıyasla başlangıç su içeriği değerinden daha çok uzaklaştığı görülmüştür.



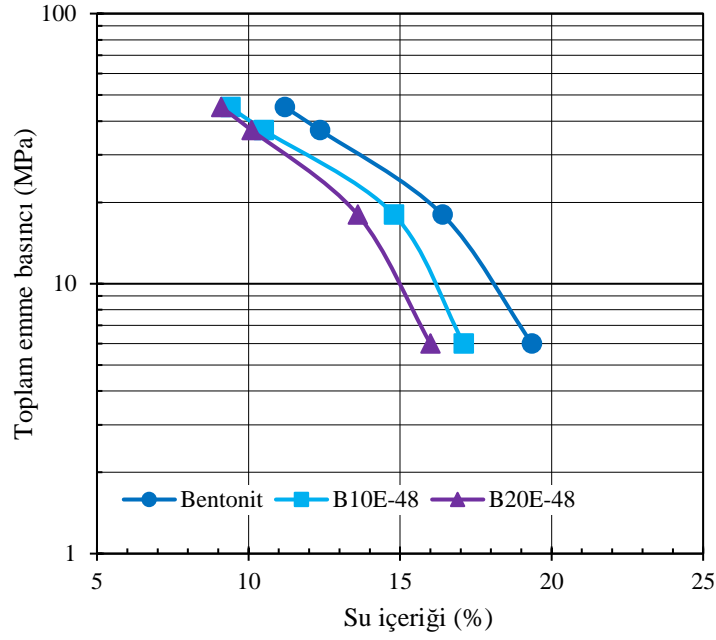


Şekil 2. E-48 katkılı bentonit karışımlarının zemin su-karakteristik eğrileri (dolu semboller:nemlenme, boş semboller:kuruma)

Ek olarak düşük emme basıncı değerlerinde (<24 MPa) zemin-su karakteristik eğrilerinde bir bükülme meydana gelmiştir. Numunelerin kuruma yolu sonrası gözlemlenen su tutma kapasitelerinde histeretik davranış belirlenmiştir. Özellikle, kuruma yolu sırasındaki düşük emme basıncı değerlerinde, numuneler nemlenme yolu sırasında ulaştıkları su içeriği değerlerine erişmeden daha yüksek değerlerde dengelenmiştir. Bir başka deyişle numunelerin su tutma kapasitelerinde artış olmuştur. Zemin daha kuru koşullara geçerken, gerilme durumu değiştikçe zemin, su ve hava fazlarının yeniden dağılımı da değişir. Zemin daneleri arasındaki nem etkileşim alanı, zemin emme basıncındaki artışla birlikte azalır (Vanapalli ve Fredlund, 2000; Fredlund ve Rahardjo, 1993). Genel olarak bakıldığında aynı su içeriği değerinde E-48 minerali bentonitin emme basıncı değerini azaltıcı yönde etki etmiştir. Bu azalma nemlenme yolunun aşağı doğru kayması ile de açıkça görülmektedir.

Yüksek sıcaklıkta (80 °C), sıkıştırılmış bentonit ve bentonite %10 ve %20 oranlarında E-48 eklenerek hazırlanan karışımların ZSKE incelenmiştir. Farklı su içeriği değerlerinde dengeye gelen bentonit karışımlarının ZSKE'leri Şekil 3'te sunulmuştur.





Şekil 3. E-48 katkılı bentonit karışımlarının yüksek sıcaklıkta zemin su-karakteristik eğrileri

E-48 katkılarının 80 °C'deki deneylerde su tutma eğrisini sola kaydıracağı gözlenmiştir. Bunun anlamı belirli bir emme basıncı değerinde E-48 katkılı numunelerin su tutma kapasitelerinin bentonite kıyasla azalmış olmasıdır. Ayrıca yüksek sıcaklık etkisi ile karışımların su tutma kapasitelerinin belirgin bir şekilde azaldığı da bulgulanmıştır. Örneğin, 10 kPa'lık bir emme basıncında, oda sıcaklığında bentonit %22 su içeriğine sahipken, bu değer 80 °C'de %18'e düşmüştür. Ayrıca, %15 su içeriğinde, katkısız bentonitin emme değeri oda sıcaklığında 37 MPa'dan 80 °C'de 25 MPa'ya düşerek %30'luk bir azalma göstermiştir. İlk tuz çözeltisinde tüm karışımlarda su içeriği artmıştır, bu artış bentonite kıyasla daha az olup, başlangıçtaki emme basınçlarının E-48 ilavesiyle azaldığı söylenebilir. Başka bir deyişle katkısız bentonit, E-48 ilaveli karışımlara göre daha fazla su tutma kapasitesine sahiptir.

Ayrıca Şekil 3'ten de açıkça görülebileceği üzere özellikle düşük emme basıncı değerlerinde katkı yüzdesi %10 değerinden %20 değerine arttırıldığında E-48 mineralinin su tutma kapasitesini azaltıcı etkisi artmıştır. Örneğin, 20 MPa emme basıncında bentonitin su içeriği %16 olarak tespit edilmiştir. Buna karşın, E-48 eklenmesiyle bu değer %13.2 ile %14.5 arasında belirlenmiştir. Yüksek emme basınçlarında birbirlerine yakın olan eğriler, daha düşük emme basıncı değerlerinde (<37 MPa), birbirlerinden uzaklaşarak aralarındaki farklar daha da belirgin hale gelmiştir. Bununla birlikte yüksek sıcaklık etkisi su tutma kapasitesini belirgin bir şekilde azaltmıştır. Ayrıca, katkılı karışımlar, katkısız bentonite kıyasla yüksek sıcaklıktan daha olumsuz etkilenmiştir, bu da E-48 katkısının bentonitin emme davranışı üzerinde olumsuz bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Bentonit mineralleri, yüzeylerinde bulunan elektrik yükleri ile tanınır. Bentonit oranı arttıkça, bu minerallerin yüksek özgül yüzey alanları sayesinde parçacıkların yüzey elektrik yükleri de artar. Bu nedenle, daha fazla bentonit içeren bir karışımın, aynı su miktarıyla daha yüksek osmotik ve emme kuvvetlerine sahip olması öngörülmektedir (Durukan vd., 2014). E-48 eklenmesi, bentonitin hacimsel oranını azalttığı için karışımın su tutma kapasitesi düşer. Aynı zamanda, aynı yapı ve mineralojik özelliklere sahip bir zemin numunesinin, farklı



başlangıç su içeriği, porozite, gerilme geçmişi ve sıkıştırma enerjisi gibi faktörlerden ötürü aynı su tutma kapasitesine sahip olmayabileceği unutulmamalıdır (Lambe, 1960; Gens, 1995).

Artan sıcaklık ile su tutmadaki azalmanın yüzey gerilimindeki veya kapiler bileşendeki azalmadan kaynaklandığı rapor edilmiştir (Tang ve Cui, 2005). Romero vd (2000), BDT kullanarak farklılıkların sadece yüzey gerilimindeki değişimden değil, aynı zamanda kil dokusundaki ve kilin boşluk-su kimyasındaki değişiminden de kaynaklandığını bulgulamışlardır. Kil yapısında ve boşluk suyu kimyasında sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen değişimin geri döndürülemez olması beklenmektedir (Romero vd., 2000). Ye vd. (2009), kilin dokusu ve içerisindeki suyun dağılımının su tutma kapasitesi üzerindeki kritik rolünü vurgulayarak, yükselen sıcaklıkların dane içindeki suyun daha geniş boşluklara yönlendirilmesine yol açtığını ifade etmiştir. Bu yönlendirme, suyun söz konusu boşluklardan dışarı sızmasına, belirli bir emme basıncı değerinde doygunluğun sabit kalmasına ve sonuç olarak bentonitin su tutma kapasitesinin düşmesine sebep olmaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, katkısız bentonit ve E-48 katkılı karışımların oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta (80 °C) su tutma kapasiteleri BDT kullanılarak incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen temel bulgular aşağıdaki gibidir:

- 1) Kuruma yolu nemlenme yolu ile aynı hızda olmamasına rağmen, kuruma karakteristik eğrisi tüm karışımlar için sürekli olarak ıslanma eğrisinin üzerinde kalmıştır.
- 2) E-48 katkısı hem oda sıcaklığı hem de 80 °C’de bentonitin su tutma kapasitesini azaltıcı yönde etki etmiştir.
- 3) Kuruma yolu sırasında, numuneler nemlenme yolu sırasında ulaşılan değerlerden daha yüksek su içeriği değerlerinde stabilize olmuştur, bu da su tutma kapasitesinde bir artış olduğunu göstermektedir.
- 4) Tüm karışımların su tutma kapasitesi yüksek sıcaklığın etkisiyle önemli ölçüde azalmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir (Proje no: 120M470). Yazarlar bu destek için minnettardır.

KAYNAKLAR

- Alkan, M. ve Doğan, M. (2004), "Dissolution Kinetics of Colemanite in Oxalic Acid Solutions", Chemical Engineering and Processing, Vol 43(7), 867-872.
- Bachmann, J., Horton, R., Grant, S.A. ve van der Ploeg, R.R. (2002), "Temperature Dependence of Water Retention Curves for Wettable and Water-Repellent Soils", Soil Science Society of America Journal, Vol 66(1), 44-52.
- Bag, R. ve Rabbani, A. (2017), "Effect of Temperature on Swelling Pressure and Compressibility Characteristics of Soil", Applied Clay Science, Vol 136, 1-7.



- Demir, F., Sarıkaya, M. ve Özbayoğlu, G. (2011), "Production and Application of Boron Compounds", Journal of Chemical Technology and Biotechnology, Vol 86(4), 475-482.
- Durukan, S., Pulat, H.F. ve Yükselen-Aksoy, Y. (2014), "Suction Characteristics of Compacted Zeolite-Bentonite and Sand-Bentonite Mixtures", Waste Management & Research, Vol 32(2), 149-156.
- Dutt, R., Sharma, R. ve Singh, A. (2012), "Groundwater Infiltration and Its Implications in Nuclear Waste Containment", Hydrogeology Journal, Vol 20(4), 677-688.
- Fraser, H., MacDougall, J. ve Reid, C. (2015), "Swelling Pressure Behavior of Bentonite under Hydration Conditions", Geotechnical and Geological Engineering, Vol 33(6), 1387-1398.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H. (1993), "Soil Mechanics for Unsaturated Soils", John Wiley & Sons, Inc.
- Gens, A. (1995). "Modern Issues in Non-Saturated Soils", Constitutive laws. In A. Gens, P. Jouanna, & B. A. Schrefler (Eds.), 129–158, Wien: Springer Verlag.
- He, Y., Ye, W.M., Chen, Y.G., Chen, B., Ye, B. ve Cui, Y.J. (2016), "Influence of Pore Fluid Concentration on Water Retention Properties of Compacted GMZ01 Bentonite", Applied Clay Science, Vol 129, 131-141.
- Lambe, T.W. (1960), "Structure of Compacted Clay", Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol 125, 682-705.
- Marcial, D., Delage, P. ve Cui, Y.J. (2002), "On the High Stress Compression of Bentonites", Canadian Geotechnical Journal, Vol 39, 812–820.
- Martín, P.L., Barcala, J.M. ve Huertas, F. (2006), "Large-Scale and Long-Term Coupled Thermo-Hydro-Mechanic Experiments with Bentonite: the FEBEX Mock-up Test", Journal of Iberian Geology, Vol 32, 259–282.
- Özkan, Ş.G., Çebi, H., Delice, M.D. (1997), "Bor Minerallerinin Özellikleri ve Madenciligi", In 2 Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, pp: 224-228, izmir, Türkiye.
- Romero, E., Gens, A. ve Lloret, A. (2000), "Temperature Effects on the Hydro-Mechanical Behaviour of Bentonite", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 126(3), 199-212.
- Romero, E., Gens, A., ve Lloret, A. (2001), "Temperature Effects on the Hydraulic Behaviour of an Unsaturated Clay", Geotechnical and Geological Engineering, Vol 19(3-4), 311-332.
- Sultan, N., Delage, P., Cui, Y.J. ve Tang, A.M. (2012), "Impact of High Temperatures on the Hydro-Mechanical Behavior of Soils in Nuclear Waste Disposal Contexts", Engineering Geology, Vol 127, 33-43.
- Tang, A.M. ve Cui, Y.J. (2005), "Controlling Suction by the Vapour Equilibrium Technique at Different Temperatures and Its Application in Determining the Water Retention Properties of MX80 Clay", Canadian Geotechnical Journal, Vol 42(1), 287–296.
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G. (2000), "Comparison of Different Procedures to Predict Unsaturated Soil Shear Strength", Geotechnical Special Publication, 195- 209.
- Xie, M., Qian, L. ve Yang, Y. (2006), "Impact of Decay Heat on the Performance of Nuclear Waste Repositories", Journal of Nuclear Materials, Vol 354(1-3), 55–61.
- Ye, W.M., Cui, Y.J., Qian, L.X. ve Chen, B. (2009), "An Experimental Study of the Water Transfer Through Compacted GMZ Bentonite", Engineering Geology, Vol 108, 169–176.

