



Yüksek sıcaklık ve Etibor-48 mineralinin bentonitin şişme basıncı ve zemin-su karakteristik eğrileri üzerindeki etkileri

Effects of high temperature and Etibor-48 mineral on the swelling pressure and soil-water characteristic curves of bentonite

Şukran Gizem Alpaydın^{1*} , Yeliz Yukselen Aksoy²

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Arel Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

sukrangizemalpaydin@arel.edu.tr

²İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye.

yeliz.yukselen@deu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 08.10.2024

Düzeltilme Tarihi/Revision: 14.01.2025

doi: 10.5505/pajes.2025.04575

Kabul Tarihi/Accepted: 27.01.2025

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Yüksek seviyeli nükleer atıkların güvenli bertarafı için derin jeolojik depolarda tampon ve/veya dolgu malzemesi olarak sıkıştırılmış bentonit kullanımı önerilmektedir. Bentonitin yüksek şişme potansiyeli ve düşük geçirgenlik özellikleri, bu önerinin temel dayanaklarını oluşturmaktadır. Depolarda kullanılan bentonit, yeraltı suyu ile hidrate olarak kendiliğinden sızdırmaz bir bariyer oluştururken, aynı zamanda atık kutusundan yayılan yüksek sıcaklığa maruz kalacaktır. Bu süreçte, dış bölgelerde şişme eğilimi görülürken, atık kutusuna yakın bölgelerde yüksek sıcaklık nedeniyle doymun olmayan bir ortam oluşabilmektedir. Bu koşullar, bentonitin hidrolik ve mekanik özelliklerini etkileyebilir ve uzun vadeli performansını sınırlayabilir. Bu nedenle, bentonitin yeraltı suyu hareketleri ve sızdırmazlık özelliklerinin değerlendirilmesi için farklı termal koşullarda zemin-su karakteristik eğrilerinin ve şişme basıncının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Sıcaklık döngüleri, bentonitin su tutma kapasitesi ve şişme basıncı gibi kritik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu çalışmada, bentonitin yüksek sıcaklık koşullarındaki mühendislik özelliklerini iyileştirmek amacıyla, düşük termal genleşme özelliği ile bilinen Etibor-48 (E-48) bor minerali katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Sıkıştırılmış bentonite %10 ve %20 oranlarında E-48 bor minerali eklenerek karışımların şişme basıncı ile zemin-su karakteristik eğrileri, oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık (80 °C) koşullarında incelenmiştir. Şişme basıncı deneyleri sabit hacim yöntemiyle ödeometre sisteminde, zemin-su karakteristik eğrileri ise buhar denge tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Bulgular, yüksek sıcaklık ve E-48 katkısının bentonitin su tutma kapasitesini ve şişme basıncını azalttığını ortaya koymuştur. Ayrıca kuruma yolunun nemlenme yoluyla örtüşmediği ve katkısız bentonitin, E-48 katkılı karışımlara kıyasla daha yüksek su tutma kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, yüksek sıcaklık koşullarında bentonit bazlı tampon malzemelerin performansını değerlendirmek ve optimize etmek için katkı maddelerinin etkisini anlamada önemli bilgiler sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Nükleer atık, Yüksek sıcaklık, Bentonit, Şişme basıncı, Zemin-su karakteristik eğrisi, Etibor-48.

Abstract

Compacted bentonite as a buffer and/or backfill material in deep geological repositories is recommended to safely dispose of high-level nuclear waste. The high swelling potential and low permeability properties of bentonite are the main bases for this recommendation. Bentonite used in the repositories will hydrate with groundwater to form a self-sealing barrier while exposed to the high temperature emitted from the canister. In this process, the outer zones tend to swell, while the zones close to the canister may become unsaturated due to the high temperature. These conditions can affect the hydraulic and mechanical properties of bentonite and limit its long-term performance. Therefore, determining soil-water characteristic curves and swelling pressure at different thermal conditions is of great importance for evaluating groundwater movement and sealing properties of bentonite. Temperature cycles can adversely affect critical properties of bentonite, such as water retention capacity and swelling pressure. In this study, Etibor-48 (E-48) boron mineral, known for its low thermal expansion properties, was used as an additive to improve the engineering properties of bentonite under high temperature conditions. E-48 mineral was added to the compacted bentonite at 10% and 20% ratios, and the swelling pressure and soil-water characteristic curves of the mixtures were investigated at room temperature and high temperature (80 °C) conditions. The swelling pressure tests were performed using the constant volume method in an oedometer system, and the soil-water characteristic curves were determined using the vapor equilibrium technique. The results showed that high temperature and E-48 addition decreased the water retention capacity and swelling pressure of bentonite. It was also found that the drying path did not overlap with the wetting path, and the additive-free bentonite had a higher water retention capacity than the E-48-added mixtures. These results provide important insights into understanding the effect of additives to evaluate and optimize the performance of bentonite-based buffer materials under high-temperature conditions.

Keywords: Nuclear waste, High temperature, Bentonite, Swelling pressure, Soil-water characteristic curve, Etibor-48.

1 Giriş

Yüksek seviyeli nükleer atıkların güvenli şekilde bertaraf edilmesi için derin jeolojik depolarda sıkıştırılmış bentonitin tampon veya dolgu malzemesi olarak kullanılması tavsiye edilmektedir [1]-[3]. Bu bariyer malzemesi, deponun uzun süreli işletimi boyunca termal (T), hidro (H), mekanik (M) ve kimyasal (C) süreçlerin bir araya geldiği karmaşık etkileşimlere

maruz kalmaktadır. Bu süreçler arasında nükleer atığın bozunmasıyla oluşan yüksek sıcaklık, jeolojik yapılar içerisinden sızan yeraltı suyu, radyonüklidlerin kutudan olası sızıntısı ve bentonitin su alımı sırasında gelişen şişme basıncı yer almaktadır [4]-[6]. Tampon malzemelerinin sızdırmazlık performansı ise bentonitin şişme özelliklerine bağlıdır. Bentonit, su ile temas ettiğinde şişerek atık depo içerisindeki boşlukları ve çatlakları etkili bir şekilde kapatır. Bu şişme

*Yazışılan yazar/Corresponding author

özellikli, yeraltı suyunun depo içine girişini engelleyerek radyonüklidlerin çevreye yayılmasını önler. Ayrıca, nükleer atık depolama sahalarında bentonitin şişme basıncı, kutu stabilitesinin korunmasında hayati bir rol oynar. Tampon malzemeler depo ortamında yüksek sıcaklıklara maruz kalır ve bu da malzemenin hidrolik ve mekanik özelliklerinde değişimlere neden olur [7]. Sonuç olarak, sıkıştırılmış bentonitin hem termal hem de mekanik gerilmeler altında davranışını anlamak, nükleer atık depolarının uzun vadede güvenliğini sağlamak açısından kritik öneme sahiptir [8].

Bentonitin zemin-su özellikleri, sızdırmazlık bariyeri olarak etkinliğinde kritik bir rol oynar. Boşluk suundaki sıcaklık değişiklikleri, zeminin hidro-mekanik özelliklerini etkileyebilir. Su tutma kapasitesini etkileyen temel faktörlerden biri de, sıcaklık arttıkça azalan yüzey gerilimidir. Ancak su tutma kapasitesindeki azalma, yalnızca yüzey gerilimindeki termal değişimlerle tam anlamıyla açıklanamaz [9]. Örneğin, doğal zeminlerin zemin-su karakteristik eğrileri (ZSKE) 5 ila 38 °C arasında yüzey gerilimi değişiminden dolayı beklenenden daha fazla sıcaklığa bağlıdır [10].

Killerin şişme basıncı, kullanılan kilin tipi ve miktarı, katyon türü, boşluk sıvısının özellikleri, dielektrik sabiti ve sıcaklık gibi birçok etkene bağlıdır. Montmorillonit mineralinde sıcaklık arttıkça difüz çift tabaka kalınlığı artarken, boşluk sıvısının dielektrik sabiti azalır. Bu iki faktör zeminde zıt etkilere neden olur ve nihai sonuç kilin türüne bağlıdır. Pusch ve diğ. [11], sıcaklığın bentonitin şişme basıncı üzerindeki etkisinin, kildeki baskın katyona bağlı olarak büyük ölçüde değişiklik gösterdiğini belirtmiştir. Bir diğer çalışmada ise, doymuş koşullarda sıcaklık arttıkça şişme basıncında önemli bir düşüş kaydedilmiştir [12]. Bu azalma, yüksek sıcaklıklarda ara katman suyunun kararsızlığına bağlanmıştır. Benzer şekilde, Villar ve Lloret [13], FEBEX bentoniti üzerinde yüksek sıcaklıklarda şişme basıncında azalma olduğunu rapor etmiştir. Cho ve diğ. [14] ise, yüksek sıcaklıklarda Ca-bentonitin şişme basıncında bir artış gözlemlemiştir. Bu artışın nedenini, yüksek sıcaklıklarda hidrasyon kuvveti ve ozmotik basınç arasındaki denge ile boşluk suyu ve zemin iskeletinin farklı termal genişmesi sonucunda ortaya çıkan yüksek boşluk suyu basıncına bağlamışlardır. Bag ve Rabbani'nin [8] çalışmasında da sıkıştırılmış bentonit üzerinde sabit hacimli şişme basıncı testlerinde, sıcaklık arttıkça (25, 40, 50, 70 ve 90 °C) şişme basıncında artış gözlenmiştir.

Nükleer atık depolama tesislerinde kullanılan bentonit karışımlarının mühendislik özelliklerini incelemek ve geliştirmek, özellikle yüksek sıcaklık koşullarında hem güvenlik hem de verimlilik açısından büyük önem taşımaktadır. Zeminin termal etkilere karşı direncini korumak amacıyla, ısıya dayanıklılığı ve düşük termal genişleme özelliği ile bilinen bor gibi katkı maddelerinin kullanımı, olası bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Doğada elementel formda bulunmayan bor, oksijen ve diğer elementlerle birleşerek kolemanit, tinkal ve üleksit gibi mineraller oluşturur. Bor, camın termal genişleme özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra, asit ve çözümlere karşı direnç, ayrıca yüksek sıcaklık ile sıcaklık şoklarına karşı koruma sağlar [15]. Günümüzde, bor bileşiklerinin üretimi nükleer teknoloji, cam-seramik endüstrisi ve tarımdan gelen talep nedeniyle artış göstermektedir [16],[17].

Bu çalışma, yüksek sıcaklıkların bentonitin su tutma kapasitesi ve şişme basıncı üzerindeki etkilerini incelemeye odaklanmıştır. Ayrıca, bentonitin yüksek sıcaklıktaki

performansını artırmak amacıyla, Etibor-48 (E-48) bor minerali katkı maddesi olarak eklenmiştir. Bentonit ve bor katkılı bentonit karışımlarının su tutma kapasitesi buhar denge tekniği (BDT) ile şişme basıncı ise ödeometre cihazı ile sabit hacim yöntemi kullanılarak hem oda sıcaklığında hem de 80 °C'de belirlenmiştir.

2 Malzeme ve yöntem

2.1 Malzeme

Bu çalışmada, kalsiyum içerikli bentonit ile bor minerali olan Etibor-48 (E-48) kullanılmıştır. E-48 numuneleri, 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.

Table 1. Physico-chemical properties of bentonite and E-48 mineral.

Özellik	Ca-Bentonit	Etibor-48
Özgül Ağırlık [18]	2.60	1.82
Likit Limit (%) [19]	270	-
Plastik Limit (%) [19]	63	-
Plastisite İndeksi (%) [19]	207	-
Doğal su içeriği (%) [20]	6-8	11-13
pH [21]	9.13	9.25
-No. 200 (%) [22]	100	39.60

Bentonit-bor karışımlarında, E-48 minerali bentonit numunesinin toplam kuru ağırlığının %10 ve %20'si oranında eklenmiştir. Numunelerin adlandırılmasında katkı maddesi içeriği ve malzemelerin baş harfleri kullanılmıştır. Örneğin, B10E48 olarak adlandırılan bir karışım, bentonitin kuru ağırlığının %10'u oranında E-48 minerali içermektedir.

2.2 Deneysel yöntemler

2.2.1 Zemin-Su karakteristik eğrilerinin belirlenmesi

Bu çalışmada, sıkıştırılmış bentonitin ve bor minerali E-48 katkılı bentonit karışımlarının su tutma kapasiteleri ve şişme basınçları oda sıcaklığı ve 80 °C'de belirlenmiştir. Numuneler, 30 mm çapında ve 10 mm yüksekliğinde özel olarak tasarlanmış rijit halkalar içerisinde, tek eksenli deney aparatı ile sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Sıkıştırma işlemi sırasında yaklaşık 55 MPa basınç uygulanmış ve bu da numunelerde sabit bir kuru yoğunluk değeri ($1.4 \pm 0.1 \text{ Mg/m}^3$) elde edilmesini sağlamıştır. Zemin-su karakteristik eğrileri (ZSKE), serbest hacim koşulları altında Buhar Denge Tekniği (BDT) kullanılarak analiz edilmiştir. BDT yöntemi literatürde özellikle yüksek emme değerleri aralığında (3 MPa - 1000 MPa) güvenilir sonuçlar elde etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [23]-[26]. Bu teknik, doymuş tuz çözeltileri kullanılarak farklı bağıl nem seviyelerinde sabit emme koşullarının oluşturulmasına dayanmaktadır. Deneyler serbest hacim koşulları altında gerçekleştirilmiş olup, bentonit numuneleri belirlenen kuru yoğunlukta sıkıştırılmış ve tuz çözeltileriyle dengeye ulaşması sağlanmıştır. Deney sırasında numunenin hacmi sınırlandırılmamış, ancak nem geçişini kolaylaştırmak amacıyla üst ve alt yüzeylerinde buhar giriş çıkışına izin veren özel düzenekler kullanılmıştır. BDT, sıkıştırılmış numunelerin nem alma ve kuruma süreçlerini incelemek amacıyla kullanılmış, bağıl nemi kontrol etmek için ise doymuş tuz çözeltileri kullanılmıştır. Bu çalışmada, 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 çözeltileri içeren desikatörler içerisine alındıktan sonra önce bu tuzlarla nemlendirilmiş, ardından aynı tuz çözeltileri ters sırayla kullanılarak numuneler kuruma işlemine tabi tutulmuştur.

Bu çalışmada, numunelerin başlangıçtaki emme farklılıklarını en aza indirmek amacıyla her bir numune için küçük desikatörler (küçük cam kavanozlar) kullanılmıştır. Küçük desikatörlerin tercih edilmesinin bir diğer nedeni, numunelerin su içeriği açısından dengeye ulaşma süresini kısaltmaktır. Bu amaçla, kavanozlar sıkıca kapatılarak sızdırmazlık sağlanmış ve deney boyunca sabit koşulları korumak amacıyla %70 nem ve 25 °C sıcaklıkta sabit tutulan bir inkübatöre yerleştirilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Deneyel sistem. (a): İnkübatör. (b): Numunelerin inkübatöre yerleştirilmesi.

Figure 1. Experimental system. (a): Incubator. (b): Placement of samples in the incubator.

Kavanozlara yerleştirilen numuneler, belirli aralıklarla hassas terazilerde tartılmıştır. Hidrasyon sonucu ağırlık değişimi 0.01 g'dan daha az olduğunda, numune bir sonraki daha yüksek bağıl neme sahip doymuş tuz çözeltisi içeren kavanoza aktarılmıştır. Nemlenme işlemi tamamlandıktan sonra, aynı işlem kuruma yolu için ters sırada tekrarlanmıştır. 80 °C'deki ZSKE'nin belirlenmesi amacıyla, numuneler oda sıcaklığındaki işlemlerle benzer şekilde hazırlanmıştır. Yüksek sıcaklık testlerinde inkübatör yerine etüv kullanılmıştır. Yüksek sıcaklıklarda tuz çözeltilerinin bağıl nem değerlerindeki değişiklikler göz önünde bulundurularak, nemlendirme işlemi için sırasıyla NaCl, KCl, $ZnSO_4$ ve K_2SO_4 tuz çözeltileri seçilmiş ve düşükten yükseğe doğru bağıl neme göre sıralanmıştır.

2.2.2 Şişme basıncı deneyleri

Numunelerin şişme basıncı değerleri, sabit hacim yöntemi kullanılarak belirlenmiştir [27]. Numuneler, tek eksenli deney cihazında sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Bu işlemde, 50 mm çapında krom rijit bir halka, yükleme plakası ve yaka özel olarak imal ettirilmiştir (Şekil 2). Numuneler, %7.5 doğal su içeriğinde, 1.3 Mg/m³ kuru yoğunluk elde edilebilmesi için 60 MPa statik yük altında halka içerisinde sıkıştırılmıştır.

Deneyin ilk aşamasında, sıkıştırılmış numune ödeometre hücresine yerleştirilmiş ve suyun eşit dağılmasını sağlamak amacıyla numunenin üstüne ve altına hava kurusu poroz taşlar yerleştirilmiştir. Numunenin hidrasyon süreci, ödeometre hücresine su doldurularak başlatılmıştır. Şişmeyi engellemek için numunelere kademeli olarak eksenel yük uygulanmıştır.



Şekil 2. Numunelerin sıkıştırılması. (a): Tek eksenli deney cihazı. (b): Sıkıştırılmış numune.

Figure 2. Compaction of specimens. (a): Uniaxial testing machine. (b): Compacted specimen.

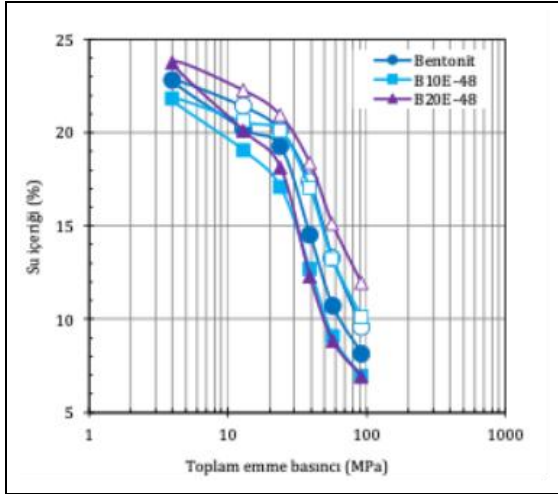
Sabit bir düşey gerilme altında şişmenin tamamlanabilmesi için numunenin serbest suya erişimi sağlanmıştır. Şişme ve sıkışma deformasyonunu ± 0.01 mm ile sınırlamak amacıyla yük ayarlamaları yapılmıştır. Numuneye uygulanan gerilme, herhangi bir hacim değişikliği olmaması için sürekli olarak artırılmış veya azaltılmıştır. Şişme basıncı deneyi, numune tamamen doymuş hale gelene kadar sürdürülmüş ve hacim değişikliği olmadan numuneye uygulanan son basınç, maksimum şişme basıncı olarak kaydedilmiştir.

80 °C'de yapılan şişme basıncı deneyleri, yüksek sıcaklık koşulları için modifiye edilmiş ödeometre düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklığı sağlamak amacıyla özel bir ısı halkası kullanılmış, sıcaklığın 80 °C'de sabit kalması için bir termostat devreye alınmıştır. Deney süresince sıcaklık değerleri, dijital bir termometreye bağlı K-tipi termokupullarla sürekli olarak izlenmiş ve kaydedilmiştir. Sistem modifikasyonunun ardından, deneysel prosedür ortam sıcaklığındaki ile aynı şekilde yürütülmüştür.

3 Deneyel sonuçlar ve tartışma

3.1 Zemin-Su karakteristik eğrilerinin belirlenmesi

Sıkıştırılmış bentonit ve %10 ile %20 oranlarında E-48 katkı bentonit karışımlarının ZSKE oda sıcaklığı ve 80 °C'de BDT kullanılarak belirlenmiştir. Oda sıcaklığında, farklı emme basınçlarında dengeye gelen bentonit karışımlarının zemin-su karakteristik eğrileri Şekil 3'te gösterilmiştir. Ayrıca, E-48 katkı numunelerin başlangıç kuru birim hacim ağırlığı ve başlangıç su içeriği değerleri Tablo 2'de, doymuş tuz çözeltilerindeki denge su içeriği değerleri ise Tablo 3'te listelenmiştir.



Şekil 3. E-48 katkılı bentonit karışımlarının zemin-su karakteristik eğrileri (dolu semboller:nemlenme, boş semboller:kuruma).

Figure 3. Soil water-characteristic curves of E-48 added bentonite mixtures (filled symbols: moistening, empty symbols: drying).

Tablo 2. Karışımların başlangıç koşulları.

Table 2. Initial conditions of the mixtures.

Karışım	Kuru birim hacim ağırlık (Mg/m ³)	Başlangıç su içeriği (%)
Bentonit	1.41	7.50
B10E-48	1.41	7.24
B20E-48	1.41	7.02

Tablo 3. ZSKE belirlenmesinde karışımların oda sıcaklığında denge su içeriği değerleri.

Table 3. Equilibrium water content values of the mixtures in the determination of SWCC at room temperature.

	Tuz	Emme basıncı (MPa)	Su içeriği (%)		
			Bentonit	B10E 48	B20 E48
Islanma	CaNO ₃	92	8.1	6.9	6.9
	NaNO ₂	57	10.7	9.1	8.8
	NaCl	39	14.5	12.7	12.3
	KCl	24	19.3	17.1	18.1
	ZnSO ₄	13	20.2	19.1	20.1
	K ₂ SO ₄	4	22.8	21.8	23.8
Kuruma	ZnSO ₄	13	21.4	20.6	22.3
	KCl	24	20.1	20.1	20.9
	NaCl	39	17.3	17.0	18.4
	NaNO ₂	57	13.3	13.2	15.1
	CaNO ₃	92	9.6	10.1	11.9

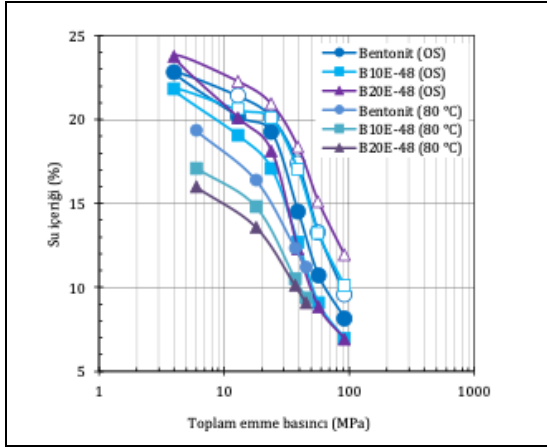
Numuneler öncelikle CaNO₃ doygun tuz çözeltisine maruz bırakılmıştır. Bu koşul altında, %51 bağıl nemde ve 92 MPa emme basıncıyla dengede olan katkısız bentonitin su içeriği %8.1'e ulaşmıştır, bu da numunenin başlangıçta daha yüksek bir emme basıncına sahip olduğunu göstermektedir. Çünkü, bir numune 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 (K₂SO₄) karşılık gelen emme basıncı değeri 4 MPa olmuştur. Bu noktada katkısız bentonitin su içeriği %22.8 olarak ölçülmüştür. Kuruma yolu ise nemlenme yolundan farklı sonuçlar vermiştir; tüm karışımlar için kuruma karakteristik eğrileri her zaman ıslanma eğrilerinin üzerinde seyretmiştir. Örneğin, katkısız bentonitte %15 su içeriği seviyesinde, nemlenme yolundaki emme basıncı 37 MPa iken, kuruma yolunda aynı su içeriğinde bu basınç 50 MPa değerine yükselmiştir. Diğer CaNO₃ çözeltisindeki su içeriği nemlenme yolunun başında %8.1 iken, kuruma sonunda %9.6 değerine çıkmıştır.

E-48 katkılı numunelerde, başlangıçta hafif bir kuruma eğilimi görülmüştür, bu da bu karışımların emme basınçlarının 92 MPa'dan düşük olduğunu gösterir. Başlangıç tuz çözeltisinde (92 MPa), E-48 eklenmiş numunelerin su içeriği değerleri Tablo 3'te listelendiği gibi %6.9 olarak elde edilmiştir. E-48 katkılı numunelerin aynı su içeriği için emme basıncı değerleri, nemlenme yolu için katkısız bentonite kıyasla daha düşük olarak belirlenmiştir. Ayrıca %15 su içeriğinden daha düşük değerlerde %10 ve %20 E-48 katkılı numunelerin nemlenme eğrileri birbiriyle örtüşmüştür. Su içeriği arttıkça eğriler birbirinden ayrılmıştır. Kuruma süreci tamamlandığında, E-48 katkılı numunelerin su içeriği %10-12 aralığında olmuş ve bentonite kıyasla başlangıç su içeriğinden daha fazla sapma göstermiştir.

Düşük emme basıncı değerlerinde (<24 MPa), zemin-su karakteristik eğrilerinde bir bükülme gözlemlenmiştir. Numunelerin kuruma sonrası su tutma kapasitelerinde histeretik bir davranış belirlenmiştir; bu durum nemlenme sırasında elde edilen belirli bir emme basıncı değerinde su tutma kapasitesinin, kuruma sırasında aynı emme basıncında elde edilen kapasiteden farklı olduğunu göstermektedir. Özellikle, kuruma sürecindeki düşük emme basıncı değerlerinde, numuneler nemlenme sırasında ulaştıkları su içeriği değerlerine erişmeden daha yüksek su içeriği değerlerinde dengelenmiştir. Başka bir deyişle, numunelerin su tutma kapasitelerinde bir artış meydana gelmiştir. Zemin daha kuru koşullara geçerken, gerilme durumu değiştikçe zemin, su ve hava fazlarının yeniden dağılımı değişir. Zemin daneleri arasındaki nem etkileşim alanı, zemin emme basıncındaki artışla birlikte azalır [28], [29]. 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 ile %10 ve %20 oranlarında E-48 eklenmiş karışımların ZSKE incelenmiştir. Bu analizler sırasında, emme basınçlarına karşılık gelen bağıl nem değerlerini yansıtan doygun tuz çözeltileri tercih edilmiştir. Uygun tuz çözeltilerini belirlemek üzere ön deneyler yapılmış ve 80 °C altında NaCl tuz çözeltisinin başlangıç çözeltisi olarak uygun olduğu tespit edilmiştir (Emme basıncı: 45 MPa). Doymuş tuz çözeltileriyle dengeye ulaşana kadar 80 °C'lık etüv içinde desikatörlerde tutulan numuneler, belirli zaman aralıklarında tartılarak denge su içerik değerleri elde edilmiştir. Farklı su içeriği değerlerinde dengeye gelen bentonit karışımlarının ZSKE Şekil 4'te sunulmuştur. Ayrıca, bor katkılı tüm numunelerin başlangıç kuru yoğunluk ve başlangıç su içeriği değerleri Tablo 4'te ve bununla birlikte doygun tuz çözeltileri içerisinde dengeye ulaştıkları su içerikleri Tablo 5'te verilmiştir.



Şekil 4. E-48 katkılı bentonit karışımlarının yüksek sıcaklıkta zemin-su karakteristik eğrileri.

Figure 4. High temperature soil water-characteristic curves of E-48 added bentonite mixtures.

Tablo 4. Karışımların başlangıç koşulları.

Table 4. Initial conditions of the mixtures.

Karışım	Kuru birim hacim ağırlık (Mg/m ³)	Başlangıç su içeriği (%)
Bentonit	1.40	8.00
B10E-48	1.39	7.82
B20E-48	1.41	7.33

Tablo 5. Yüksek sıcaklıkta ZSKE belirlenmesinde karışımların denge durumundaki su içerikleri.

Table 5. Equilibrium water contents of mixtures for determination of SWCC at elevated temperature.

Tuz	Emme Basıncı (MPa)	Su içeriği (%)		
		Bentonit	B10E-48	B20E-48
NaCl	45	11.2	9.4	9.1
KCl	37	12.4	10.5	10.1
ZnSO ₄	18	16.4	14.8	13.6
K ₂ SO ₄	6	19.4	17.1	16

E-48 katkıları, 80 °C'deki deneylerde su tutma eğrisini sola kaydırmıştır; bu da belirli bir emme basıncı değerinde E-48 katkılı numunelerin su tutma kapasitelerinin bentonit ile karşılaştırıldığında azaldığını göstermektedir. Ayrıca yüksek sıcaklık etkisi ile karışımların su tutma kapasitelerinin belirgin bir şekilde azaldığı da bulgulanmıştır. Örneğin, 10 kPa emme basıncında, oda sıcaklığında bentonit %22 su içeriğine sahipken, bu değer 80 °C'de %18 değerine düşmüştür. Ek olarak, %15 su içeriğinde ise, katkısız bentonitin emme basıncı oda sıcaklığında 37 MPa'dan 80 °C'de 25 MPa'ya düşerek %30'luk bir azalma göstermiştir. NaCl tuz çözeltisinde tutulan karışımlar için, ilk denge değerleri incelendiğinde, katkısız bentonit numunesinin su içeriği %11.2 değerine yükselmiştir, bu da bentonitin başlangıçtaki emme basıncı değerinin 45 MPa'dan daha fazla olduğunu gösterir. İlk tuz çözeltisinde tüm karışımların su içeriği artmıştır, bu artış bentonite kıyasla daha az olup, başlangıçtaki emme basınçlarının E-48 ilavesiyle azaldığı söylenebilir. Yani, katkısız bentonit, E-48 ilaveli karışımlara göre daha fazla su tutma kapasitesine sahiptir.

Ayrıca, Şekil 4'ten de açıkça görülebileceği gibi, özellikle düşük emme basıncı değerlerinde, E-48 mineralinin su tutma

kapasitesini azaltıcı etkisi, katkı yüzdesinin %10'dan %20'ye çıkmasıyla birlikte artmıştır. Örneğin, 20 MPa emme basıncında bentonitin su içeriği %16 olarak belirlenmiştir. E-48 eklenmesiyle bu değer %13.2 ile %14.5 arasında kalmıştır. Yüksek emme basınçlarında eğriler birbirine yakın iken, düşük emme basıncı değerlerinde (<37 MPa) birbirlerinden uzaklaşarak aralarındaki farklar daha belirgin hale gelmiştir. Yüksek sıcaklık etkisi, su tutma kapasitesini belirgin şekilde azaltmıştır. Örneğin, %15 su içeriğinde katkılı karışımların oda sıcaklığındaki emme basıncı değerleri, sıcaklık 80 °C'ye çıkarıldığında yaklaşık 30-35 MPa değerinden 10-18 MPa değerlerine azalmıştır. E-48 ilavesi her iki sıcaklıkta da bentonitin emme basıncını düşürmüştür. Ayrıca, katkılı karışımlar, katkısız bentonite kıyasla yüksek sıcaklıktan daha olumsuz etkilenmiştir, bu da E-48 katkısının bentonitin emme potansiyelinin üzerinde olumsuz bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Zeminlerin su tutma kapasitesini belirleyen en önemli faktörlerden biri yüzey gerilimidir. Bentonit oranı arttıkça, bu minerallerin yüksek özgül yüzey alanlarına sahip olmaları nedeniyle parçacıkların yüzey elektrik yükleri de artar. Bu yüzden, bentonit oranı daha yüksek olan bir karışımın, aynı su miktarında daha güçlü osmotik ve emme kuvvetlerine sahip olması beklenir [30]. E-48'in eklenmesi, bentonitin hacimsel oranını azalttığı için karışımın su tutma kapasitesinde azalma meydana gelir. Aynı zamanda, aynı yapıya ve mineralojik özelliklere sahip bir zemin numunesinin, farklı başlangıç su içeriği, porozite, gerilme geçmişi ve sıkıştırma enerjisi gibi faktörler nedeniyle her zaman aynı su tutma kapasitesine sahip olmayabileceği unutulmamalıdır [31],[32],[33].

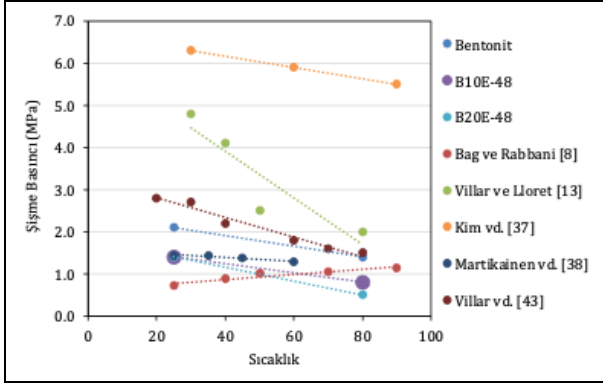
Sıcaklık arttıkça su tutma kapasitesindeki azalmanın, yüzey gerilimi veya kapiler bileşendeki azalmadan kaynaklandığı rapor edilmiştir [34]. Romero ve diğ. [35] BDT kullanarak, deneysel olarak elde edilen toplam emme basıncındaki değişimin, suyun yüzey gerilimindeki değişimden kaynaklanan toplam basınç değişiminden daha fazla olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada, farkların yalnızca yüzey gerilimindeki değişimden değil, aynı zamanda kil yapısı ve kilin boşluk suyu kimyasındaki değişimlerden de kaynaklandığı tespit edilmiştir. Sıcaklığa bağlı olarak kil yapısında ve boşluk suyunda meydana gelen bu değişimlerin geri döndürülemez olduğu düşünülmektedir [35]. Ye ve diğ. [36], kil yapısının ve içindeki suyun dağılımının, su tutma kapasitesi üzerindeki kritik rolüne dikkat çekmiştir. Araştırmada, artan sıcaklıkların kildeki suyun daha büyük boşluklara yönelmesine neden olduğu belirtilmiştir. Bu yönelme, bu boşluklardan suyun sızmasına yol açarak belirli bir emme basıncı değerinde sürekli doygunluk sağlayıp ve bu durum bentonitin su tutma kapasitesini azaltmaktadır.

3.2 Şişme basıncı deneyleri

Şişme basıncı deneyleri, katkısız bentonit ve E-48 katkılı bentonit karışımları üzerinde hem oda sıcaklığında hem de 80 °C'de gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerle E-48 mineralinin ve yüksek sıcaklığın bentonitin şişme basıncına olan etkileri incelenmiştir. Ayrıca, bu çalışmada elde edilen bulgular, literatürde bildirilen bentonit örnekleriyle karşılaştırılmıştır (Şekil 5). Elde edilen bulgular, E-48 katkısının ve yüksek sıcaklıkların bentonitin şişme basıncını azalttığı yönündedir (Şekil 6).

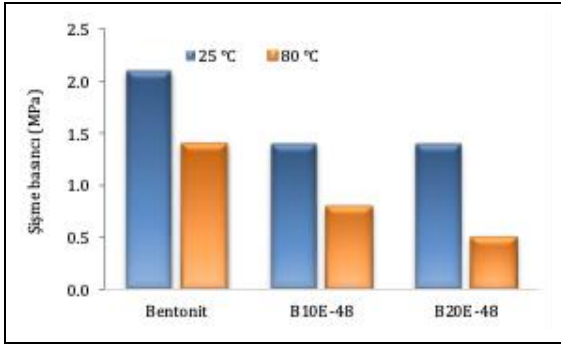
Oda sıcaklığında yapılan ölçümlerde, katkısız bentonitin şişme basıncı 2.1 MPa iken, E-48 eklenmesiyle bu değer %33 azalarak 1.4 MPa'ya düşmüştür (Tablo 6). Ancak, şişme basıncı, E-48

katkısının miktarındaki değişimden etkilenmemiştir (Şekil 7). Öte yandan, oda sıcaklığında E-48 içeriğindeki değişim tutarlı bir eğilim göstermemiştir.



Şekil 5. Şişme basıncının sıcaklığa bağlı değişimi: Bu çalışma ve literatürde bildirilen bentonit örneklerinin karşılaştırılması.

Figure 5. Temperature-dependent swelling pressure: Comparison between this study and bentonite samples reported in the literature.



Şekil 6. Bentonitin E-48 varlığında oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta şişme basıncı değerleri.

Figure 6. Swelling pressure values of bentonite at room temperature and high temperature in the presence of E-48.

Tablo 6. Bentonitin E-48 varlığında oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta şişme basıncı değerleri.

Table 6. Swelling pressure values of bentonite at room temperature and high temperature in the presence of E-48.

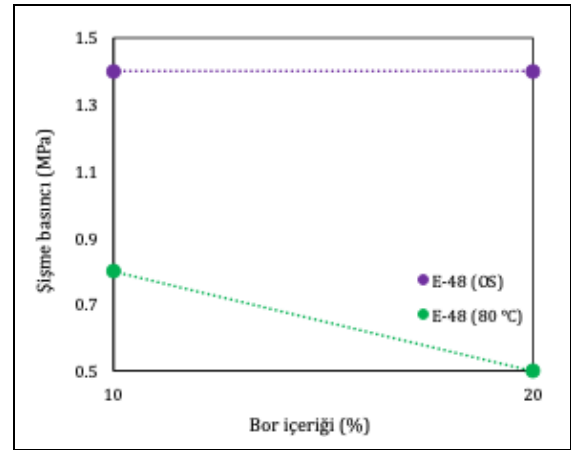
Sıcaklık	Şişme Basıncı (MPa)		
	Bentonit	B10E-48	B20E-48
25 °C	2.1	1.4	1.4
80 °C	1.4	0.8	0.5

Sıcaklığın artmasıyla birlikte tüm karışımların şişme basıncı değerlerinde düşüş gözlenmiştir (Şekil 6). E-48 minerali bentonite eklendiğinde, şişme basıncı oda sıcaklığında %33, 80 °C'de ise %64 oranında azalmıştır. Bu bulgu, E-48 mineralinin özellikle yüksek sıcaklık koşullarında bentonitin şişme basıncı üzerindeki azaltıcı etkisinin oldukça belirgin olduğunu göstermektedir.

Bentonitin şişme basıncı, içeriğindeki kilin türü ve miktarı, kanyon cinsi, boşluk sıvısının özellikleri, dielektrik sabiti ve sıcaklık gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Katkı maddelerinin şişme basıncını düşürmesinin temel nedenlerinden biri, genleşebilirliğin kil minerallerine özgü bir özellik olmasıdır [39]. Bentonit karışımları hazırlanırken, katkı maddeleri

arasında temasla büyük gözenekler oluşur ve bu durum karışımın homojenliğini bozarak şişme basıncının azalmasına yol açabilir. Ayrıca, bentonit bazlı malzemelerin eksenel sıkıştırılması sırasında kil danelerinin yönelimi de katkı maddelerinin varlığına bağlı olarak rastgele bir şekilde değişir. Sato ve Suzuki [40], katkı maddesi içeriği arttıkça bu düzensiz yönelimlerin daha belirgin hale geldiğini belirtmişlerdir.

Sıcaklığın montmorillonit üzerindeki etkisi; tabakalar arası boşluklarda adsorbe edilen su hacminde değişiklik, daneler arasındaki mesafedeki değişimler, serbest su hacmindeki değişiklikler ve mineralin termal genleşmesi olarak açıklanabilir [8],[13],[41],[42],[43]. Push [12] doygun koşullarda daha yüksek sıcaklıklarda şişme basıncında belirgin bir düşüş olduğunu belirtmiştir. Bu düşüş, yüksek sıcaklıklarda katmanlar arası suyun kararsız hale gelmesiyle ilişkilendirilmiştir. Sıcaklık arttıkça, kilin şişmesinde önemli rol oynayan mikroyapısal su, makro yapıya kayar ve bu durum bentonitin şişme basıncında azalmaya yol açar.



Şekil 7. Oda sıcaklığı ve 80 °C'de şişme basıncı değerlerinin bor minerali yüzdesine göre değişimi.

Figure 7. Variation of swelling pressure values according to the percentage of boron minerals at room temperature and 80 °C.

4 Sonuçlar

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

1. Kuruma yolu, nemlenme yolu ile örtüşmemekle birlikte, kuruma karakteristik eğrisi tüm karışımlar için sürekli olarak ıslanma eğrisinin üzerinde kalmıştır.
2. E-48 katkısı hem oda sıcaklığında hem de 80 °C'de bentonitin su tutma kapasitesini azaltıcı etki göstermiştir.
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 kapasiteleri, yüksek sıcaklık etkisiyle önemli ölçüde azalmıştır.
5. Yüksek sıcaklık, tüm karışımların şişme basıncında azalmaya neden olmuştur.

6. E-48 mineralinin eklenmesi hem oda sıcaklığında hem de 80 °C'de bentonitin şişme basıncını düşürmüştür.

Araştırma bulguları, bentonit ve E-48 katkılı karışımlarının yüksek sıcaklık koşullarına maruz kalan nükleer atık depolama sahaları gibi mühendislik uygulamalarında kullanılabilirliğini değerlendirmek açısından önemlidir. Oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta E-48 katkısının su tutma kapasitesi ve şişme basıncı üzerindeki azaltıcı etkileri negatif yönde gözlemlenmiştir. Ancak bu bulgular, malzemenin mühendislik uygulamalarında değerlendirilmesi için tek başına yeterli değildir. Bentonit bazlı tampon malzemelerin kullanılabilirliğini ve performansını anlamak için termo-hidro-mekanik-kimyasal (THMC) davranışlarının bütüncül bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Araştırma sonuçları, bu tür malzemelerin modifikasyonu ve mühendislik uygulamalarındaki potansiyel kullanımları için değerli bir temel sağlamaktadır.

5 Conclusions

In this study, the water retention capacity and swelling pressure values of additive-free bentonite and E-48 added mixtures were investigated using BDT and constant volume method, respectively, at room temperature and high temperature (80 °C). The main findings obtained from the study are as follows:

1. Although the drying path did not coincide with the wetting path, the drying characteristic curve was consistently above the wetting curve for all mixtures.
2. The E-48 additive reduced the water retention capacity of bentonite both at room temperature and at 80 °C.
3. During the drying path, the samples stabilized at higher water content values than those reached during the wetting path, indicating an increase in the water retention capacity.
4. The water retention capacity values of all mixtures decreased significantly under the influence of high temperature.
5. High temperature caused a decrease in the swelling pressure of all mixtures.
6. The addition of E-48 decreased the swelling pressure of bentonite both at room temperature and 80 °C.

The research findings are significant in assessing the usability of mixtures containing bentonite and E-48 additives in engineering applications such as nuclear waste storage sites exposed to high-temperature conditions. The reducing effects of the E-48 additive on water retention capacity and swelling pressure were observed negatively at both room temperature and high temperature. However, these findings alone are insufficient to evaluate the material's suitability for engineering applications. A comprehensive evaluation of the thermo-hydro-mechanical-chemical (THMC) behavior is required to understand the usability and performance of bentonite-based buffer materials. The research results provide a valuable basis for the modification of such materials and their potential applications in engineering.

6 Teşekkür

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

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Şükran Gizem Alpaydın deneysel ve yöntemsel araştırma, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, literatür taraması ve orijinal taslak hazırlanması başlıklarında; Yeliz Yükselen Aksoy, deneysel ve yöntemsel araştırma, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, literatür taraması kullanılan malzemelerin temin edilmesi, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

8 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".

9 Kaynaklar

- [1] He Y, Ye WM, Chen YG, Chen B, Ye B, Cui YJ. "Influence of pore fluid concentration on water retention properties of compacted GMZ01 bentonite". *Applied Clay Science*, 129, 131-141, 2016.
- [2] Marcial D, Delage P, Cui YJ. "On the high stress compression of bentonites". *Canadian Geotechnical Journal*, 39(4), 812-820, 2002.
- [3] Martín PL, Barcala JM, Huertas F. "Large-scale and long-term coupled thermo-hydro-mechanic experiments with bentonite: the FEBEX mock-up test". *Journal of Iberian Geology*, 32(2), 259-282, 2006.
- [4] Dutt R, Sharma R, Singh A. "Groundwater infiltration and its implications in nuclear waste containment". *Hydrogeology Journal*, 20(4), 677-688, 2012.
- [5] Fraser H, MacDougall J, Reid C. "Swelling pressure behavior of bentonite under hydration conditions". *Geotechnical and Geological Engineering*, 33(6), 1387-1398, 2015.
- [6] Xie M, Qian L, Yang Y. "Impact of decay heat on the performance of nuclear waste repositories". *Journal of Nuclear Materials*, 354(1-3), 55-61, 2006.
- [7] Sultan N, Delage P, Cui YJ. "Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay". *Engineering Geology*, 64(2-3), 135-145, 2002.
- [8] Bag R, Rabbani A. "Effect of temperature on swelling pressure and compressibility characteristics of soil". *Applied Clay Science*, 136, 1-7, 2017.
- [9] Romero E, Gens A, Lloret A. "Temperature effects on the hydraulic behaviour of an unsaturated clay". *Geotechnical and Geological Engineering*, 19(3-4), 311-332, 2001.
- [10] Bachmann J, Horton R, Grant SA, van der Ploeg RR. "Temperature dependence of water retention curves for wettable and water-repellent soils". *Soil Science Society of America Journal*, 66(1), 44-52, 2002.
- [11] Pusch R, Karlndal O, Hokmark H. "General Microstructural Model for Qualitative and Quantitative Studies of Smectite Clays". SKB Technical Report 90-43, Stockholm, Sweden, 1990.
- [12] Pusch R. "Permeability of compacted highly bentonitic clay". *Engineering Geology*, 14(1-2), 111-119, 1980.
- [13] Villar MV, Lloret A. "Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite". *Applied Clay Science*, 26 (1-4), 337-350, 2004.
- [14] Cho WJ, Lee JO, Kang CH. "Influence of temperature elevation on the sealing performance of a potential buffer material for a high-level radioactive waste repository". *Annals of Nuclear Energy*, 27(14), 1271-1284, 2000.

- [15] Özkan ŞG, Çebi H, Delice MD. "Bor minerallerinin özellikleri ve madenciligi". 2. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 16-17 Ekim 1997.
- [16] Alkan M, Doğan M. "Dissolution kinetics of colemanite in oxalic acid solutions". *Chemical Engineering and Processing*, 43(7), 867-872, 2004.
- [17] Demir F, Sarıkaya M, Özbayoğlu G. "Production and application of boron compounds". *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 86(4), 475-482, 2011.
- [18] ASTM International. "Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM D854-14". West Conshohocken, PA, USA, 2014.
- [19] ASTM International. "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM D4318-05". West Conshohocken, PA, USA, 2005.
- [20] ASTM International. "Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, ASTM D2216-19". West Conshohocken, PA, USA, 2019.
- [21] ASTM International. "Standard Test Methods for pH of Soils, ASTM D4972-19". West Conshohocken, PA, USA, 2019.
- [22] ASTM International. "Standard Test Methods for Determining the Amount of Material Finer than 75-µm (No. 200) Sieve in Soils by Washing, ASTM D1140-00". West Conshohocken, PA, USA, 2000.
- [23] Tessier D. Etude Expérimentale de L'organisation des Matériaux Argileux: Hydratation, Gonflement et Structuration au Cours de la Dessiccation et de la Réhumectation. Thèse de Doctorat d'état, Université de Paris VII, Paris, Fransa, 1984.
- [24] Romero E. Characterization and Thermo-Hydro-Mechanical Behaviour of Unsaturated Boom Clay: An Experimental Study. PhD. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, 1999.
- [25] Delage P, Cui YJ. *L'eau Dans les Sols non Saturés*. Techniques de l'Ingénieur – Traité Construction, C301, Paris, Fransa, 2000.
- [26] Villar MV. Caracterización termo-hidro-mecánica de una bentonita de Cabo de Gata. Ph.D. Thesis, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Spain, 2000.
- [27] ASTM D4546. "Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils". ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2021.
- [28] Vanapalli SK, Fredlund DG. *Comparison of different procedures to predict unsaturated soil shear strength*. Editors: Shackelford CD, Houston SL, Chang NY. Advances in Unsaturated Geotechnics (ASCE Geotechnical Special Publication), 195-209, Reston, VA, USA, ASCE, 2000.
- [29] Fredlund DG, Rahardjo H. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. 1st ed. New York, USA, John Wiley & Sons, 1993.
- [30] Durukan S, Pulat HF, Yukselen-Aksoy Y. "Suction characteristics of compacted zeolite-bentonite and sand-bentonite mixtures". *Waste Management & Research*, 32(2), 149-156, 2014.
- [31] Lambe TW. "The structure of compacted clay". *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 125(1), 682-705, 1960.
- [32] Gens A. *Modern issues in non-saturated soils: Constitutive laws*. Editors: Gens A, Jouanna P, Schrefler BA. Modern Issues in Non-Saturated Soils, 129-158, Wien, Austria, Springer Verlag, 1995.
- [33] Delage P, Graham I. "State of the art report - understanding the behavior of unsaturated soils requires reliable conceptual models". *1st International Conference on Unsaturated Soils*, Paris, France, 6-8 September 1995.
- [34] Tang AM, Cui YJ. "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*, 42(1), 287-296, 2005.
- [35] Romero E, Gens A, Lloret A. "Temperature effects on the hydro-mechanical behaviour of bentonite". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(3), 199-212, 2000.
- [36] Ye WM, Cui YJ, Qian LX, Chen B. "An experimental study of the water transfer through compacted GMZ bentonite". *Engineering Geology*, 108(3-4), 169-176, 2009.
- [37] Kim M, Lee S, Cheon E, Kim M, Yoon S. "Thermochemical changes on swelling pressure of compacted bentonite". *Annals of Nuclear Energy*, 151(2), 107882, 2021.
- [38] Martikainen J, Laurila T, Kumpulainen S, Leupin OX. "Bentonite Swelling Pressure Response to Temperature Change". *Applied Clay Science*, 260, 107504, 2024.
- [39] Cui S, Zhang H, Zhang M. "Swelling characteristics of compacted GMZ bentonite-sand mixtures as a buffer/backfill material in China". *Engineering Geology*, 141-142, 65-73, 2012.
- [40] Sato H, Suzuki S. "Fundamental study on the effect of an orientation of clay particles on diffusion pathway in compacted bentonite". *Applied Clay Science*, 23(1/4), 51-60, 2003.
- [41] Chen YG, Dong XX, Zhang XD, Ye WM, Cui YJ. "Combined thermal and saline effects on the swelling pressure of densely compacted GMZ bentonite". *Applied Clay Science*, 166, 318-326, 2018.
- [42] Chen YG, Dong XX, Zhang XD, Ye WM, Cui YJ. "Cyclic thermal and saline effects on the swelling pressure of densely compacted Gaomiaozi bentonite". *Engineering Geology*, 255, 37-47, 2019.
- [43] Villar MV, Gómez-Espina R, Lloret A. "Experimental investigation into temperature effect on hydro-mechanical behaviours of bentonite". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2(1), 71-78, 2010.